УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

приоритет2030^
лидерами становятся

# МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ
# Том 3

**Материалы**
**XX Всероссийской молодёжной научной конференции**
**(г. Уфа, 12 – 15 мая 2026 г.)**



Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

# МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

## Том 3

***Материалы***
***XX Всероссийской молодёжной научной конференции***
***(г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.)***

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа
Уфимский университет
2026

УДК 621.3+681.518+629.7.05+004.7
ББК 31.2+32.965.07+39.57+16.3
М12

*Публикуется по решению ученого совета*
*Института электротехнического инжиниринга УУНиТ.*
*Протокол № 11 от 20.05.2026 г.*

***Редакционная коллегия:***
канд. техн. наук, доцент **А. В. Лобанов** *(отв. редактор)*;
канд. техн. наук, доцент **Р. Г. Фаррахов** *(секция 3.1)*
канд. техн. наук, доцент **А. А. Мухамадиев** *(секция 3.2)*;
ассистент **Д. Ш. Багаутдинова** *(секция 3.3)*;
ассистент **Я. В. Алексакина** *(секция 3.4)*;
канд. техн. наук, доцент **З. Г. Габидуллина** *(секция 3.5)*
канд. техн. наук, доцент **О. А. Юшкова** *(секция 3.5)*

**Мавлютовские чтения**: материалы XX Всероссийской молодёжной науч-
М12 ной конференции (г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.) / отв. ред. А. В. Лобанов. В 9 т. Т. 3 [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2026. – 640 с. – URL: https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2026/181.pdf – Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-6446-0
Том 3: ISBN 978-5-7477-6447-7

В 3-й том сборника материалов конференции вошли статьи секций 3.1–3.5.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей.

Все материалы представлены в авторской редакции.

УДК 621.3+681.518+629.7.05+004.7
ББК 31.2+32.965.07+39.57+16.3

ISBN 978-5-7477-6447-7 (том 3) © Уфимский университет, 2026
ISBN 978-5-7477-6446-0

**Институт электротехнического инжиниринга**

## СЕКЦИЯ 3.1 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОИЗМЕРЕНИЯ

УДК 372.862

Р.В. АФТАХОВ
*rus.aftakhov@bk.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент И.Е. ЧЕЧУЛИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИНТЕРАКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В *RLC*-КОНТУРЕ В СРЕДЕ GOOGLE COLAB

*Аннотация*. Рассмотрена проблема автоматизации анализа переходных процессов в линейных электрических цепях второго порядка в рамках лабораторного практикума по курсу «Теоретические основы электротехники». Предложен подход к созданию интерактивной вычислительной модели последовательного *RLC*-контура на базе сервиса «Google Colaboratory.

*Ключевые слова*: переходные процессы, *RLC*-контур, Google Colaboratory, SymPy, компьютерное моделирование, интерактивная визуализация.

## Введение

Курс «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) на втором году обучения в Уфимском университете науки и технологий традиционно включает раздел, посвящённый анализу переходных процессов в линейных цепях. В расчётно-графических и лабораторных работах по данной теме предполагается определение реакции последовательного *RLC*-контура на постоянное напряжение для трёх характерных режимов: апериодического, критического и колебательного. На практике студенты сталкиваются с рутинной задачей построения графиков тока и напряжения по точкам либо с использованием громоздких программных пакетов (Mathcad, Matlab), доступ к которым за пределами компьютерных классов университета ограничен. Студенты вынуждены многократно пересчитывать значения экспоненциальных и тригонометрических функций, подбирая сопротивление $R$ для достижения критического режима, что превращает содержательную физическую задачу в механическую вычислительную процедуру.

Современные облачные технологии, в частности среда «Google Colaboratory» (Colab), предоставляют бесплатный доступ к интерпретатору Python 3 с предустановленными научными библиотеками без необходимости локальной установки какого-либо специализированного программного обеспечения. Использование библиотек символьной математики «SymPy» и интерактивных виджетов «ipywidgets» позволяет в короткие сроки создавать

наглядные учебные модели, управляемые с помощью ползунков в реальном времени [1]. Целью настоящей работы является разработка и верификация такой модели применительно к типовой задаче лабораторного практикума кафедры электронной инженерии УУНиТ, а также оценка её методической ценности по сравнению с классическим расчётом «вручную» [2] .

## 1. Теоретические основы анализа переходных процессов в *RLC*-контуре

Рассмотрим последовательный колебательный контур, состоящий из резистора сопротивлением *R*, катушки индуктивности *L* и конденсатора *C*, подключаемый к источнику синусоидального напряжения *u* (рис. 1).

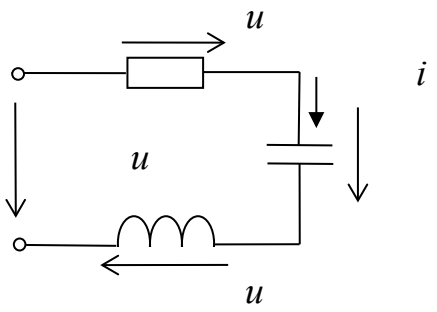



*Рис. 1.* Схема исследуемой цепи

Согласно второму закону Кирхгофа для мгновенных значений тока $i(t)$ справедливо дифференциальное уравнение:

$$L\frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C}\int idt = u\,.$$

Дифференцируя его по времени и разделив на *L*, получаем однородное дифференциальное уравнение второго порядка относительно тока:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} = 0.$$

Характер переходного процесса полностью определяется корнями характеристического уравнения [3]:

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0\,,$$

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{(\frac{R}{2L})^2 - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

В зависимости от знака подкоренного выражения различают три режима:

1) апериодический

$$i_{\text{св}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t};$$

2) предельный апериодический (критический):

$$i_{\text{св}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 t e^{p_2 t};$$

3) колебательный

$$i_{\text{св}}(t) = A_1 e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \psi).$$

Традиционный расчёт по этим формулам требует от студента выполнения громоздких тригонометрических и экспоненциальных преобразований, особенно в колебательном режиме при вычислении угла сдвига фаз. Данная работа направлена на перенос вычислительной нагрузки на ЭВМ с сохранением наглядности физической картины.

## 2. Программная реализация данной модели

2.1 Выбор инструментария

Для реализации модели была выбрана облачная платформа «Google Colaboratory», представляющая собой «Jupyter Notebook», размещённый на серверах Google с бесплатным доступом к графическому процессору (GPU) и предустановленной средой «Python 3.10».

Выбор обусловлен следующими факторами:

1) Отсутствие необходимости установки дополнительного ПО (достаточно браузера и аккаунта Google);
2) Встроенная поддержка интерактивных элементов управления «ipywidgets».
3) Удобство демонстрации результатов на любом устройстве, включая мобильный телефон.

В работе использовались библиотеки:

– «SymPy» – для символьного решения дифференциального уравнения и автоматического вывода аналитических выражений для тока i(t) в зависимости от режима.

– «NumPy» – для формирования массивов времени и вычисления значений функции тока.

– «Matplotlib» – для построения графиков переходного процесса

– «IPython.display» и «ipywidgets» – для создания ползунков и динамического обновления графика.

2.2 Алгоритм работы модели

Программный код реализует прямое вычисление тока по аналитическим формулам в зависимости от знака дискриминанта характеристического уравнения.

Структура кода включает в себя следующие блоки:

1) Функция «rlc_transient» (R, L, C, V), которая по заданным параметрам определяет тип режима, вычисляет массивы времени t и тока i(t).
2) Функция «plot_rlc» (R_val, L_mH, C_mkF, V_val), принимающая значения параметров от слайдеров, выполняющая перевод единиц (мГн → Гн, мкФ → Ф) и строящая график.
3) Создание слайдеров «FloatSlider» для интерактивного изменения R (Ом), L (мГн), C (мкФ) и V (В). Для слайдера сопротивления установлен уменьшенный шаг step=0.1, что позволяет точно настраивать значение вблизи критического режима.

4) Запуск интерактивного режима с помощью interact. В процессе отладки было выявлено, что из-за погрешностей вычислений с плавающей точкой точное равенство дискриминанта нулю достигается не всегда. Для гарантированного распознавания критического режима условие abs(disc)<$10^{-9}$ было заменено на abs(disc)<$10^{-6}$, что не искажает визуализацию, но обеспечивает корректную подпись графика. Кроме того, в код добавлен вывод точного значения критического сопротивления для заданных $L$ и $C$, которое затем можно ввести в поле слайдера.

Ниже приведён полный листинг программы.

```
def rlc_transient(R, L, C, V, t_max=None):
    # Коэффициенты характеристического уравнения: p^2 + (R/L)*p + 1/(L*C) = 0
    alpha = R / (2 * L)          # коэффициент затухания
    omega0 = 1 / np.sqrt(L * C)  # резонансная частота
    # Дискриминант
    disc = alpha**2 - omega0**2
    # Время моделирования (если не задано)
    if t_max is None:
        if R > 0:
            tau = L / R
            t_max = 8 * tau
        else:
            t_max = 0.1
    t = np.linspace(0, t_max, 1000)
    if disc > 0:  # Апериодический режим (два действительных корня)
        p1 = -alpha + np.sqrt(disc)
        p2 = -alpha - np.sqrt(disc)
        # i(t) = (V/L) * (exp(p1*t) - exp(p2*t)) / (p1 - p2)
        i = (V / L) * (np.exp(p1 * t) - np.exp(p2 * t)) / (p1 - p2)
        mode = 'Апериодический'
    elif abs(disc) < 1e-9:  # Критический режим (кратный корень)
        p = -alpha
        # i(t) = (V/L) * t * exp(p*t)
        i = (V / L) * t * np.exp(p * t)
        mode = 'Критический'
    else:  # Колебательный режим (комплексные корни)
        omega_d = np.sqrt(omega0**2 - alpha**2)  # частота затухающих колебаний
        # i(t) = (V / (omega_d * L)) * exp(-alpha * t) * sin(omega_d * t)
        i = (V / (omega_d * L)) * np.exp(-alpha * t) * np.sin(omega_d * t)
# Точное критическое сопротивление
L_nom = 0.1
C_nom = 50e-6
R_crit_exact = 2 * np.sqrt(L_nom / C_nom)
print(f"Точное R_кр = {R_crit_exact} Ом")
```

*Рис.2*. Листинг программы

## 3. Верификация модели на примере индивидуального варианта

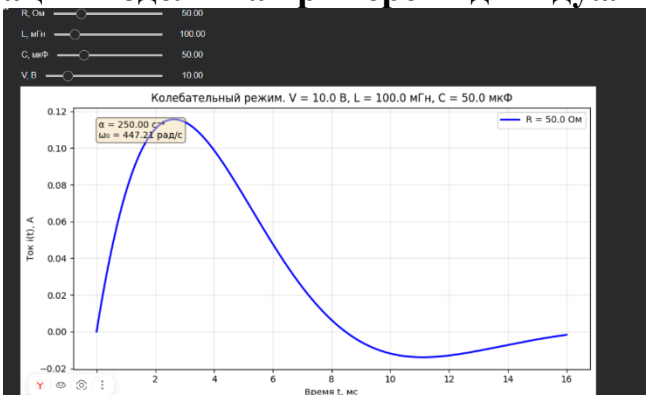



*Рис.3* Кривая тока при колебательном режиме

Для проверки адекватности разработанной модели были использованы исходные данные:

– действующие значение напряжения источника: $U$ = 10 В;

– сопротивление резистора: $R$ = 50 Ом;

– индуктивность катушки: $L$ = 100 мГн;

– емкость конденсатора: $C$ = 50 мкФ.

## Заключение

Разработанная интерактивная модель переходных процессов в последовательном *RLC*-контуре на базе облачного сервиса «Google Colaboratory» успешно верифицирована по заданным значениям параметров цепи. Полученные результаты показывают высокую степень совпадения как с классическими аналитическими расчётами, так и с графическими методами, описанными в учебной литературе.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Модель позволяет студенту в режиме реального времени визуально исследовать влияние каждого из параметров цепи $R$, $L$, $C$ на характер переходного процесса, что способствует более глубокому пониманию физики явления по сравнению с построением единичного графика по точкам.

2. Использование бесплатной облачной платформы снимает проблему лицензионной чистоты и доступности специализированного ПО для студентов, работающих на домашних компьютерах.

3. Явные аналитические формулы и программное вычисление точного критического сопротивления обеспечивают надёжную и предсказуемую работу модели, избавляя от необходимости ручного подбора параметров.

Модель может быть рекомендована к внедрению в учебный процесс кафедры электронной инженерии УУНиТ в качестве электронного тренажёра при выполнении лабораторных работ и расчётно-графических заданий, в том числе в дистанционном формате. В перспективе планируется расширение модели на случай воздействия синусоидального источника ЭДС и учёт нелинейности элементов цепи.

## Библиографический список

1. SymPy Documentation [Электронный ресурс] / SymPy Development Team. — Release 1.12. — 2023. — URL: https://docs.sympy.org/latest/index.html (дата обращения: 19.04.2026).

2. И Е. Чечулина, О.В. Мельничук, Е.В. Ларионова. Инновационные технологии как инструмент повышения качества подготовки специалистов / Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. Приоритетные ориентиры высшего образования в России: стратегическое партнерство и технологический суверенитет : материалы междунар. науч.-метод. конф., Россия. Томск. В 2 ч. Ч 1. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – С. 175-179.

3. Фатхиев А.Р., Чечулина И.Е. Переходные процессы в линейных цепях. Руководство по анализу переходных процессов в временной и частотной областях: учебное пособие – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2023, 118 с. — ISBN 978-5-7477-5860-5.

© Афтахов Р.В., 2026

УДК 681.84

М.В. ЛАВРУХИН, Ж.А. АЛЛАНАЗАРОВ
lawrusha2007@mail.ru, djalalalatdin@mail.ru
Науч. руководитель – старший преподаватель И.Р. ЕНГАЛЫЧЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# КАК РАБОТАЕТ СЕНСОРНЫЙ ЭКРАН: ФИЗИКА ПРИКОСНОВЕНИЯ

*Аннотация.* В статье рассматривается принцип работы ёмкостного сенсорного экрана. Описан физический механизм изменения ёмкости при касании экрана, представлена эквивалентная RC-схема сенсорного узла, а также принцип работы схемы измерения заряда. Показаны результаты моделирования переходного процесса в RC-цепи с переменной ёмкостью. Приведены примеры применения технологии в современных устройствах.

*Ключевые слова:* ёмкостной сенсор; сенсорный экран; RC-цепь; моделирование; LTspice; переходный процесс; электроёмкость; схемотехника.

Сенсорные экраны стали неотъемлемой частью современной электроники: смартфоны, планшеты, банкоматы, медицинские приборы и промышленные панели управления используют эту технологию ежедневно. Несмотря на широкое распространение, физические принципы, лежащие в основе работы сенсорного экрана, остаются малоизвестными широкой аудитории. В данной статье рассматривается ёмкостной тип сенсорного экрана как наиболее распространённый в современных устройствах, анализируется эквивалентная электрическая схема сенсорного узла и приводятся результаты моделирования RC-цепи с переменной ёмкостью в программной среде LTspice.

## 1. Типы сенсорных экранов и обоснование выбора

Существует несколько технологий сенсорных экранов: резистивная, ёмкостная, инфракрасная и акустическая. В резистивных экранах касание физически замыкает два проводящих слоя, разделённых зазором. Такая технология нечувствительна к влажности и работает с любым предметом, однако обладает низкой прозрачностью и ограниченным ресурсом.

Ёмкостная технология основана на изменении электрической ёмкости в точке прикосновения и не требует механического давления. Она обеспечивает высокую точность, поддержку мультитач и долговечность. Именно поэтому проекционно-ёмкостная технология (Projected Capacitive Touch, PCT) используется во всех современных смартфонах и планшетах.

## 2. Физический принцип ёмкостного сенсора

Электрическая ёмкость конденсатора определяется формулой:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S / d,$$

где $\varepsilon_0$ – электрическая постоянная (8,85 · $10^{-12}$ Ф/м); $\varepsilon_r$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; S – площадь перекрытия обкладок (м²); d – расстояние между обкладками (м).

Сенсорный экран типа PCT содержит сетку прозрачных проводящих электродов, нанесённых на стекло (как правило, из оксида индия-олова, ITO). Электроды разделены на горизонтальные (Rx) и вертикальные (Tx) линии. В узлах пересечения этих линий формируются паразитные конденсаторы с ёмкостью $C_0$ порядка 10–50 пФ.

Палец человека обладает проводимостью и, приближаясь к поверхности экрана, вносит дополнительную ёмкость C_finger (порядка 5–30 пФ) между электродом и «землёй» тела. Суммарная ёмкость узла при касании изменяется: один электрод «теряет» часть заряда на тело человека, и измерительная схема фиксирует это изменение. Именно разница ёмкостей $\Delta C = C_0 - C_touch$ является информативным сигналом, по которому контроллер определяет координаты точки касания.

**3. Эквивалентная схема сенсорного узла**

Электрическую схему одного сенсорного узла можно описать следующим образом. Источник переменного напряжения Vs с выходным сопротивлением Rs подаёт сигнал на вертикальный электрод Tx. Между Tx и Rx формируется взаимная ёмкость Cm (10–50 пФ). С горизонтального электрода Rx сигнал поступает на вход усилителя заряда с эквивалентным входным сопротивлением Rin.

При касании пальцем параллельно ёмкости Cm включается цепь: дополнительная ёмкость C_f (ёмкость палец–электрод) последовательно с сопротивлением тела человека R_body (около 1–10 кОм). Данная цепь шунтирует основную ёмкость, уменьшая амплитуду сигнала на входе Rx. Таким образом, схема измерения фиксирует изменение тока заряда, пропорциональное ΔC.

Упрощённая схема для анализа одного узла при касании описывается как RC-цепь с переменной ёмкостью. В состоянии покоя ёмкость узла равна $C_0$. В момент касания ёмкость уменьшается до значения $C_touch = C_0 - \Delta C$.

**4. Схема измерения заряда**

Для измерения изменения ёмкости в контроллерах сенсорных экранов применяется метод переноса заряда (Charge Transfer). Принцип работы следующий.

На первом этапе ёмкость электрода Cx заряжается до напряжения Vcc через ключ S1, при этом ключ S2 разомкнут. Накопленный заряд равен $Q = Cx \cdot Vcc$. На втором этапе ключ S1 размыкается, S2 замыкается, и заряд перераспределяется между Cx и известной интегрирующей ёмкостью Cint

усилителя заряда. Напряжение на выходе усилителя определяется соотношением Vout = Q / Cint = Cx · Vcc / Cint.

При касании Cx уменьшается на ΔC, что приводит к пропорциональному уменьшению Vout. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) контроллера оцифровывает Vout, и процессор по значению ΔVout вычисляет координаты касания. Типовая частота опроса сетки электродов составляет 100–240 Гц, что обеспечивает плавное отображение жестов.

### 5. Моделирование RC-цепи с переменной ёмкостью в LTspice

Для подтверждения теоретических положений выполнено моделирование переходного процесса в RC-цепи с переменной ёмкостью в программе LTspice. Параметры схемы: сопротивление R = 10 кОм, начальная ёмкость $C_0$ = 30 пФ (состояние без касания), ёмкость при касании C_touch = 18 пФ (уменьшение на ΔC = 12 пФ). Источник питания – ступенчатое напряжение 3,3 В (имитация импульса зарядки).

Анализ переходного процесса (.tran) показал следующие результаты. Постоянная времени цепи в состоянии покоя: $\tau_0 = R \cdot C_0 = 10 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-12}$ = 300 нс. Постоянная времени при касании: $\tau$_touch = R · C_touch = $10 \cdot 10^3 \cdot 18 \cdot 10^{-12}$ = 180 нс. Таким образом, время заряда конденсатора уменьшается приблизительно на 40%, что фиксируется схемой измерения как событие касания.

На осциллограмме, полученной в LTspice, наблюдаются два характерных экспоненциальных фронта: более пологий при $C_0$ и более крутой при C_touch. Разница в наклоне фронтов однозначно идентифицируется компаратором или АЦП контроллера. Параметрический анализ (.step param C LIST 30p 24p 18p) позволил наглядно показать зависимость формы переходного процесса от величины ёмкости узла.

### 6. Практическое применение технологии

Ёмкостные сенсорные экраны применяются в широком спектре устройств. В потребительской электронике (смартфоны, планшеты, ноутбуки) технология PCT обеспечивает распознавание до 10 одновременных касаний с точностью до 0,1 мм. В промышленных панелях управления используются защищённые сенсоры, работающие в перчатках или при наличии влаги на поверхности.

В медицинском оборудовании (мониторы пациента, диагностические стенды) применяются экраны с антибактериальным покрытием и усиленной чувствительностью. Банкоматы и платёжные терминалы используют ёмкостные экраны с защитой от электростатических разрядов. Автомобильные мультимедийные системы оснащаются сенсорами с расширенным температурным диапазоном (–40...+85 °C).

## Заключение

В ходе работы рассмотрен физический принцип работы ёмкостного сенсорного экрана типа PCT. Показано, что прикосновение пальца изменяет ёмкость сенсорного узла на величину ΔC, которая регистрируется схемой переноса заряда. Эквивалентная RC-цепь с переменной ёмкостью адекватно описывает динамику сигнала: уменьшение ёмкости с 30 до 18 пФ приводит к сокращению постоянной времени с 300 до 180 нс.

Моделирование в LTspice подтвердило теоретические расчёты и наглядно продемонстрировало изменение формы переходного процесса при касании. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании учебных стендов и для практического освоения методов схемотехнического моделирования.

## Библиографический список

1. Хоровиц, П. Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 1 / П. Хоровиц, У. Хилл. – Москва: Мир, 2014. – 704 с.

2. Тозер, Л. Проектирование сенсорных интерфейсов / Л. Тозер. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2016. – 256 с.

3. Cypress Semiconductor Corporation. Projected Capacitive Technology. Application Note AN2292 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cypress.com (дата обращения: 10.03.2025). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

4. Бакалов, В. П. Теория электрических цепей : учебник / В. П. Бакалов, В. Е. Дмитриков, Б. И. Крук. – Москва : Радио и связь, 2013. – 592 с.

5. Analog Devices. LTspice XVII: User Manual [Электронный ресурс]. – URL: https://www.analog.com/ltspice (дата обращения: 10.03.2025). – Режим доступа: Для зарегистрир. пользователей.

© Лаврухин М.В., Алланазаров Ж.А., 2026

УДК 681.84

Э.Р. АРТЕМЬЕВ
*aer_7002@mail.ru*
Науч. руководов. – старший преподаватель И.Р. ЕНГАЛЫЧЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## СПОСОБЫ ЦИФРОВОЙ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ АУДИОФАЙЛОВ

*Аннотация.* В данной статье рассматриваются способы цифровой записи и воспроизведения аудиофайлов, а также использующиеся в процессе устройства и программы, с целью понимания принципа их работы и влияния их

характеристик на результат. Исследуется зависимость качества записи и воспроизведения аудиофайлов от характеристик используемых записывающих и воспроизводящих устройств и программ методом спектрографического анализа.

*Ключевые слова:* Аудиофайл; аналоговый сигнал; цифровой сигнал; ЦАП; АЦП; микрофон; кодек; частота дискретизации; разрядность; спектрограмма.

В наше время огромное количество аудиофайлов хранится, передаётся и воспроизводится с помощью цифровой техники. Но то, как информацию воспринимает компьютер и то, как её воспринимают человеческий слух сильно отличается, люди воспринимают музыку как набор звуков, складывающихся в цельное произведение, в то время как для компьютера она предстаёт в виде последовательности нулей и единиц. Чтобы понять, как перевести музыку с языка компьютера, в воспринимаемый человеком звук, необходимо разобраться, как произведения записываются на компьютер.

**Аналоговый сигнал** – это непрерывный поток информации, принимающий бесконечное количество значений в своём диапазоне, плавно изменяется и несёт в себе разную информацию. На графике он принимает форму волны.

Источниками аналогового сигнала являются устройства и физические процессы, которые способны издавать непрерывные соответствующие сигналы, к ним относятся: человеческая речь, музыкальные инструменты, световые излучения, температура и т.п. К носителям аналоговой информации можно отнести: виниловые пластинки, аудио и видео кассеты, фотоплёнку.

**Цифровой сигнал** – является последовательностью дискретных значений или же нулей и единиц. Из-за этого на графике подобный сигнал будет иметь прямоугольную форму. Источниками цифрового сигнала являются устройства, способные генерировать данные в дискретном виде. К ним относятся компьютеры, смартфоны, цифровые камеры, цифровое телевидение. К носителям цифрового сигнала относятся: флешки, карты памяти, жёсткие диски, CD диски и т.п. [1]

Перед преобразованием аналоговой звуковой волны в цифровую необходимо преобразовать её в электрический сигнал, который также является аналоговым. Данную функцию выполняет микрофон.

**Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) –** это устройство, преобразующее аналоговые значения в цифровые, с заданной точностью. Преобразование аналогового сигнала в цифровой происходит в два этапа

**Дискретизация** – Процесс разбиения звукового сигнала на сэмплы в определённый промежуток времени.

Частотой дискретизации называется то, сколько сэмплов было сделано за определённое время и измеряется в герцах (кГц). Частота дискретизации выбирается так, чтобы не противоречить теореме Котельникова, из которой следует, что частота дискретизации должна быть не менее чем в два раза выше максимальной частоты сигнала, проходящего дискретизацию, чтобы сигнал

можно было восстановить по его сэмплам. Так, для обработки аудиосигналов, таких, как человеческая речь музыка используется частота дискретизации не меньше 44,1 кГц, так как человек в среднем может воспринимать звуки от 20 Гц до 20 кГц.

**Квантование сигнала** – это процесс разбиения диапазона значений непрерывной величины на конечное число интервалов. Так, полученным данным мы присваиваем значение, максимально близкое из возможного набора значений. Такой набор значений зависит от разрядности - чем она выше, тем точнее можно восстановить аналоговый сигнал из цифрового. Разрядность измеряется в битах, соответственно, чем больше бит информации, тем ближе квантованный сигнал к оригиналу.

Существует большое количество типов АЦП, применяющиеся в разных сферах и имеющие разные характеристики, но предназначенные для записи аудиофайлов называются Дельта-Сигма АЦП. Данные АЦП используют ЦОС технологии для повышения разрешения амплитудной оси и встроенный в них Фильтр нижних частот, который исключает большинство шумов квантования, что обеспечивает соотношение сигнал-шум, близкое к идеалу. [2]

После квантования и дискретизации аналогового сигнала необходимо произвести его кодировку, этим занимаются аудиокодеки. Кодек — это устройство или программное обеспечение, выполняющее кодирование и декодирование данных. В результате кодирования получается аудиофайл определённого формата. Форматы полученного аудиофайла отличаются по разрядности, частоте дискретизации, числу каналов, скорости потока данных с диска, размеру, степени и типу сжатия из чего можно выделить 3 основных типа форматов цифрового звука. Без потерь и без сжатия (WAV) Отличное качество звука и тяжёлые файлы. Без потерь и с сжатием (FLAC, ALAC) отличное качество звука и лёгкие файлы. С потерями и с сжатием (MP3, AAC). Не лучшее качество звука и очень лёгкие файлы. Например, формат CD имеет разрядность в 16 бит. Частоту дискретизации 44,1 кГц, частоту каналов 2, скорость потока данных с диска 1411,2 кбит/с, степень сжатия 1:1 без потерь. В некоторых случаях кодек может включать в себя функционал АЦП и ЦАП. [3]

В результате Аналого-Цифрового преобразования получается аудиофайл, хранящийся на цифровом носителе, который можно передавать и воспроизводить в любое время.

Обратный процессу Аналого-Цифрового преобразования Цифро-аналоговое преобразование преобразует цифровой сигнал в аналоговый, перед преобразованием необходимо дешифровать аудиофайл, эту задачу выполняет кодек, после чего сигнал передаётся на Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)

ЦАП – устройство, позволяющее преобразовывать цифровой сигнал в аналоговый. ЦАП переводит дискретные значения в напряжение. После чего это напряжение подаётся на динамики или наушники, которые преобразуют его в звуковые колебания.

Стоит отметить, что ЦАП и АЦП имеют одни и те же основные характеристики: частота дискретизации и разрядность, поэтому качество воспроизводимого звука зависит от качества всех устройств участвующих как в записи, так и воспроизведении. Невозможно обеспечить полное качество воспроизведения FLAC файла на 24 бит/384 кГц используя ЦАП на 16 бит/44,1 кГц, поскольку итоговое качество будет ограничено техническими возможностями ЦАПа, а в некоторых случаях аудиофайл вовсе не будет воспроизведён. Подобные ЦАПы, в большинстве случаев являются встроенными в устройства, такие как телефоны и ноутбуки. Для улучшения качества звука можно приобрести внешний ЦАП или устройство, содержащее в себе ЦАП. Например, для телефонов или ноутбуков подойдёт USB-ЦАП, по размеру походящий на флешку. Для компьютеров можно использовать звуковую карту, которая позволит не только воспроизводить, но и записывать звук в высоком качестве.

Существует несколько методов по оценке качества записи. Самым простым способом будет прослушивание аудио записи, но данная оценка не будет объективной, так как оценивающий может использовать не совершенное оборудование или иметь проблемы со слухом. Также можно посмотреть на характеристики файла, его частоту дискретизации и разрядность, но они также не гарантируют качество оборудования, на котором проводилась запись. Как же тогда объективно оценить качество записи аудиофайла?

Спектрограмма (сонограмма) – это двумерное графическое отображение спектра сигнала, изменяющегося во времени. Чаще всего спектрограмма представляется в виде двумерной диаграммы, на горизонтальной оси которой представлено время, на вертикальной частота, а цветом каждой точки указана амплитуда в конкретный момент. По спектрограмме можно определить какой инструмент был записан и, в некоторых случаях, распознать человеческую речь. [4]

Был проведён эксперимент, в котором была записана человеческая речь с использованием разных устройств. Для записи и анализа использовалась бесплатная программа Audacity. Голос записывался на компьютере с внешним микрофоном Fifine A8, на ноутбуке Apple MacBook Air M1 со встроенным микрофоном и на смартфоне Samsung Galaxy A15 со встроенным микрофоном. Полученные спектрограммы представлены на рис. 1 – 3.

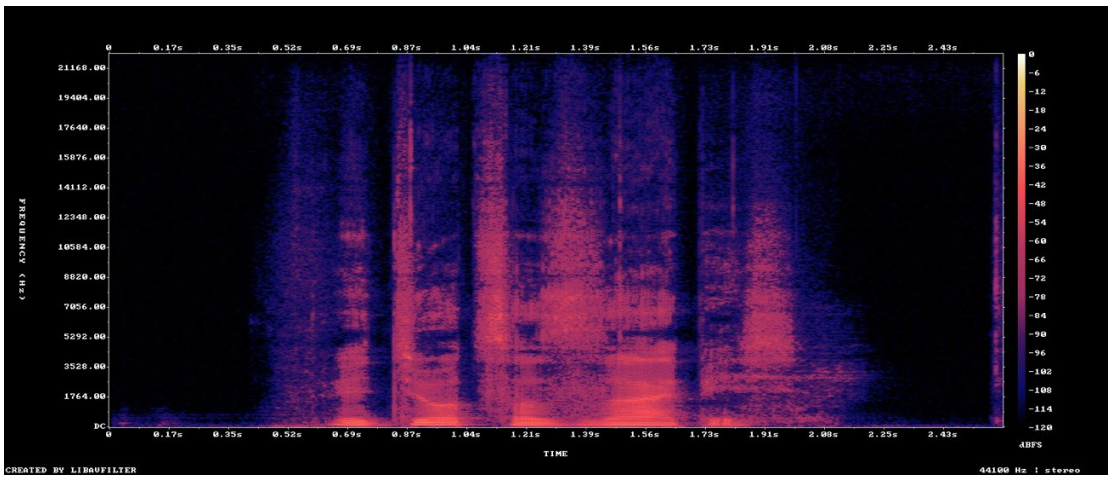



*Рис. 1.* Спектрограмма записи на компьютере

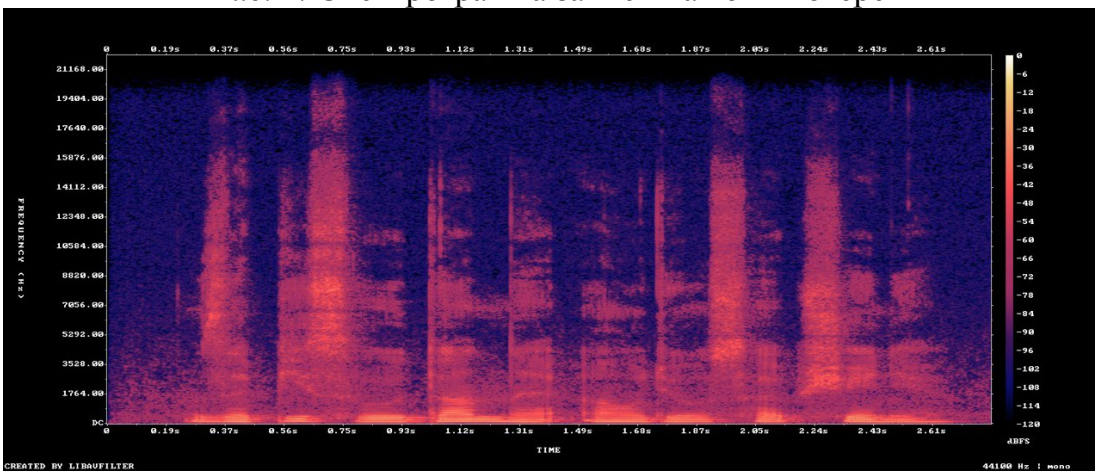



*Рис. 2.* Спектрограмма записи на ноутбуке

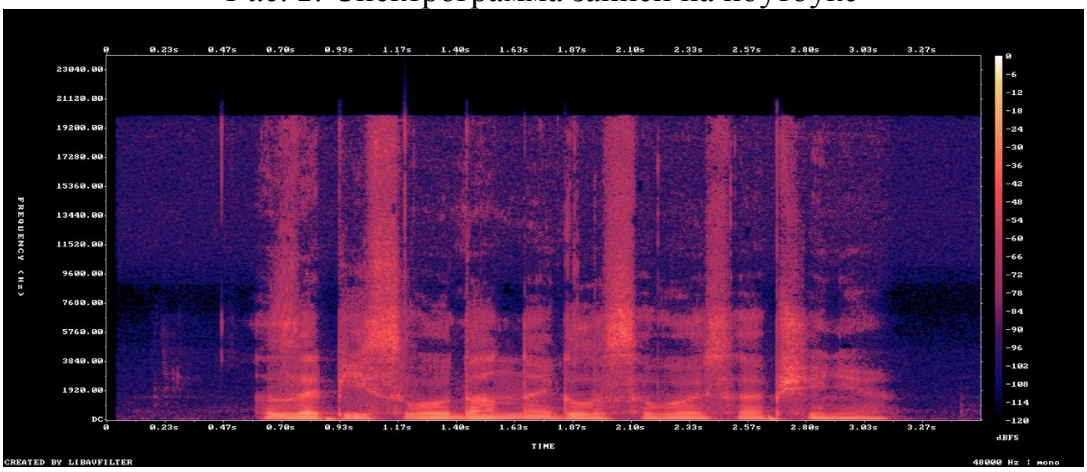



*Рис. 3.* Спектрограмма записи на телефоне

Из полученных спектрограмм можно сделать следующие выводы: на спектрограммах записей ноутбука рис. 2 и смартфона рис. 3 обрезают высокие частоты выше 20 кГц, а также обладают плохим шумоподавлением. Эти недостатки обусловлены тем, что микрофон и АЦП в этих устройствах предназначены для записи человеческого голоса. В то же время связка внешнего микрофона и компьютера показывает более чистую спектрограмму без посторонних шумов, занимающую весь диапазон спектра рис. 1. Другим экспериментом стало сохранение записи голоса с компьютера в разных форматах (MP3, WAV, FLAC) и проведение их спектрографического анализа.

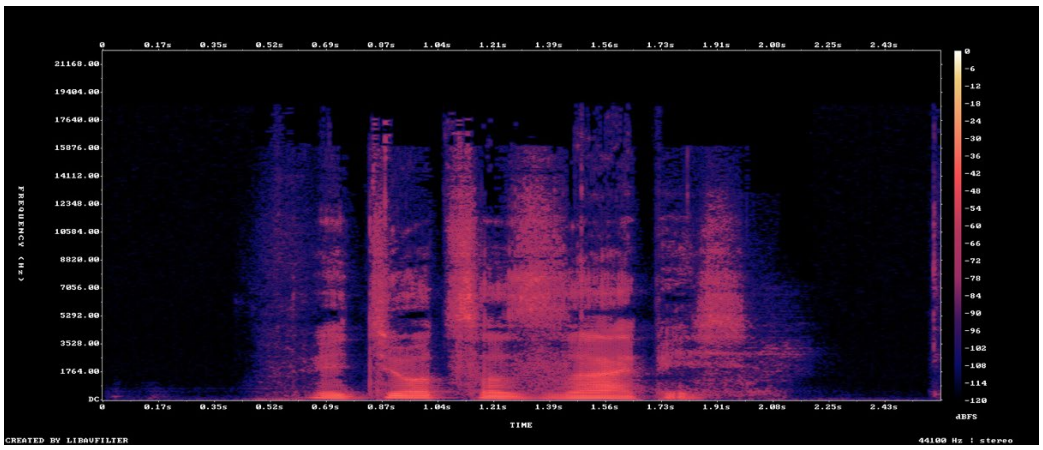



*Рис. 4.* Спектрограмма записи в формате MP3

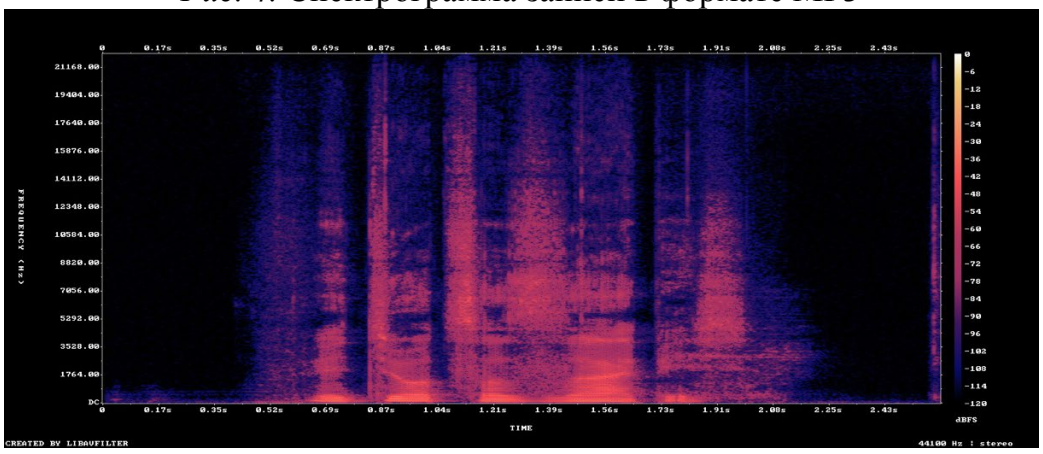



*Рис. 5.* Спектрограмма записи в формате WAV

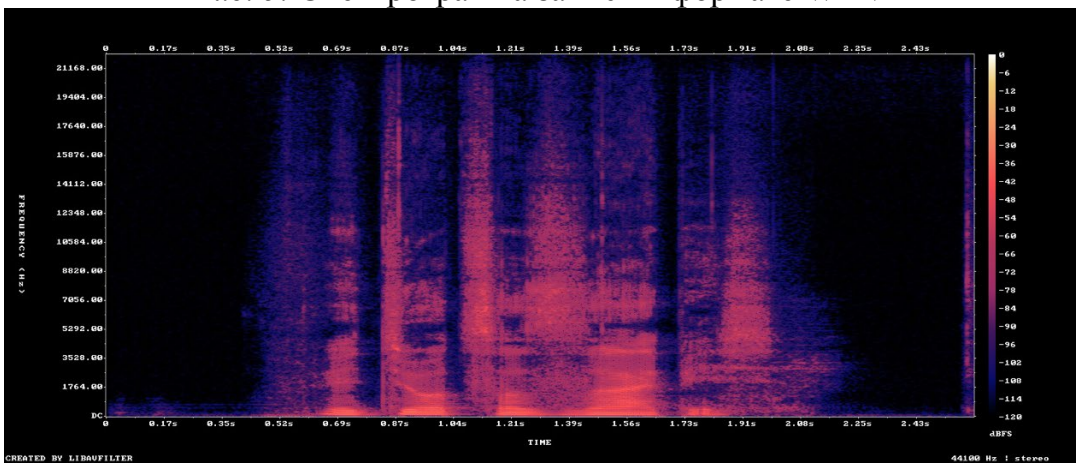



*Рис. 6.* Спектрограмма записи в формате FLAC

Из всех записей явно выделяется запись в MP3 формате рис. 4 – которая сводит близкие частоты в одну частоту с одной амплитудой и за счёт этого уменьшает битрейт (поток информации), спектр которой не превышает 18 кГц, при этом разница между спектрограммами аудиофайлов WAV и FLAC формата рис. 5 – 6 отсутствует, разница только в размере файлов. Файл формата FLAC примерно в 4 раза меньше, чем файл формата WAV, что подтверждает теоретические данные.

Заключение: в ходе работы был рассмотрен процесс цифровой записи и воспроизведения аудиофайлов, изучен полный процесс как преобразования аналогового сигнала в цифровой с применением АЦП, так и преобразование

цифрового сигнала в аналоговый с применением ЦАП. Собранная информация по устройствам, программам и характеристикам аудиофайлов была подтверждена в практической части, качество записи на устройствах, использующих встроенный АЦП и микрофон хуже, чем на устройствах в связке с внешними, так как первые предназначены только для записи голоса, а вторые для более профессиональной записи звука.

**Библиографический список**

1. Отличия аналогового звука от цифрового [Электронный ресурс] // Habr (Soundpal). – URL: https://habr.com/ru/companies/soundpal/articles/378933/ (дата обращения 20.04.2026).

2. Аналого-цифровое преобразование для начинающих [Электронный ресурс] //Habr. – URL: https://habr.com/ru/articles/125029/ (дата обращения 21.04.2026).

3. MP3, AAC, WAV, FLAC: рассказываем обо всех форматах аудиофайлов [Электронный ресурс] //Аудиомания. – URL: https://www.audiomania.ru/content/mp3-aac-wav-flac-rasskazivaem-obo-vseh-formatah-audiofaylov/ (дата обращения 21.04.2026).

4. Что такое спектрограмма? [Электронный ресурс]// eMastered. – URL https://emastered.com/ru/blog/what-is-spectrogram (Дата обращения 23.04.2026).

© Артемьев Э.Р., 2026

УДК 621.315.592

К.Ю. ТИМЕРГАЛИЕВА, А.Э. ДАУТОВА
mankarip@mail.ru, dautov.alia@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭМИТТЕРНЫХ ОБЛАСТЕЙ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

*Аннотация.* Актуальность изыскания обусловлена влиянием профиля легирования эмиттера на параметры биполярных транзисторов. Аналитическое решение с $D$=const даёт погрешности при высоких концентрациях из-за неучёта зависимости D(N). Численное моделирование нелинейного уравнения Фика корректно описывает ускоренную диффузию бора. Соотнесение методов позволяет обоснованно выбирать подход к расчёту технологических режимов.

*Ключевые слова:* диффузия бора, уравнение Фика, аналитическое решение, численное моделирование, метод конечных разностей, концентрационная зависимость, коэффициент диффузии, эмиттерная область, биполярный транзистор, профиль легирования, глубина p-n перехода, функция ошибок, технологическое проектирование.

**Цель и задачи:**

Цель исследования: сравнительная оценка точности и применимости аналитического и численного методов расчёта профилей диффузии бора в кремний при формировании эмиттерных структур биполярных транзисторов. Задачи исследования:

1.Построить математическую модель процесса диффузии с учётом начальных и граничных условий.

2.Получить аналитическое решение уравнения Фика при D=const и определить эталонный профиль легирования.

3.Реализовать численное решение методом конечных разностей для нелинейного случая концентрационно-зависимого коэффициента D(N).

4.Сравнить методы по точности прогноза глубины p-n перехода, форме профиля и вычислительной эффективности.

5.Сформулировать рекомендации по выбору подхода для технологического проектирования приборов.

## 1. Математическая постановка задачи

Формирование эмиттерной области биполярного транзистора традиционно осуществляется методом термической диффузии акцепторной примеси (бора) в кремниевую пластину n-типа. Процесс описывается одномерным вторым законом Фика в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left( D(N) \frac{\partial N(x,t)}{\partial x} \right),$$

где $N(x,t)$ — концентрация легирующей примеси в глубине $x$ в момент времени $t$, $D(N)$ — коэффициент диффузии, зависящий от локальной концентрации примеси.

Как отмечается в монографии Фридрихова С. и Мовнина С. [1], при высоких концентрациях легирующей примеси (порядка $10^{19}$–$10^{21}$ см$^{-3}$) коэффициент диффузии перестаёт быть константой. Это связано со сдвигом уровня Ферми, увеличением концентрации собственных точечных дефектов и возникновением внутреннего электрического поля, ускоряющего перенос примеси.

Для расчётной области задаются следующие начальные и граничные условия:

1) начальное условие: в исходный момент времени $t$=0 пластина не содержит легирующей примеси: $N(x,0)=0$.

2) граничное условие: на поверхности x=0 в течение всего процесса поддерживается постоянная концентрация $N(0,t)=N_s$. Данная модель

соответствует этапу преддиффузии из источника бесконечной ёмкости (газовая фаза, твёрдый источник).

**2. Аналитическое решение (постоянный коэффициент диффузии)**

В инженерной практике для предварительных оценок часто принимают $D$=const. В этом случае уравнение Фика становится линейным и допускает точное аналитическое решение через дополнительную функцию ошибок:

$$N(xt) = N_s \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right),$$

где $erfc(z)=1-erf(z)$ — дополнительная функция ошибок.

Температурная зависимость коэффициента диффузии описывается уравнением Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где $D_0$ — предэкспоненциальный множитель, Ea — энергия активации диффузии бора в кремнии, $k$ — постоянная Больцмана, $T$ — абсолютная температура. Для системы *B–Si* типичные справочные значения составляют $D_0 \approx 0{,}76$ см$^2$/с, Ea≈3,46 эВ.

Аналитический профиль служит эталоном для валидации численных алгоритмов. Согласно классической методике Степаненко И. [2], глубина залегания эмиттерного перехода $x_j$ определяется из условия $N(x_j,t)=N_B$, где $N_B$ — концентрация фоновых доноров в базе. Подстановка аналитического профиля даёт:

$$x_i = 2\sqrt{Dt} \cdot \mathrm{erfc}^{-1}\left(\frac{N_B}{N_s}\right).$$

Ограничения аналитической модели: при $Ns>10^{19}$ см$^{-3}$ предположение D=const приводит к систематическому занижению глубины перехода на 10–30%, так как не учитывает ускорение диффузии в высоколегированной области.

**3. Численное решение (концентрационно-зависимая диффузия)**

Для учёта нелинейности $D(N)$ применяется метод конечных разностей (МКР). Пространственная область $[0,L]$ разбивается на $M+1$ узлов $x_i=i\Delta x$, временной интервал — на шаги $t_n=n\Delta t$.

**3.1. Явная конечно-разностная схема**

Аппроксимация производных центральными разностями по пространству и разностью вперёд по времени приводит к рекуррентному соотношению:

$$N_i^{n+1} = N_i^n + \frac{\Delta_t}{\Delta x^2}\left[D_{i+1/2}^n\left(N_{i+1}^n - N_i^n\right) - D_{i-1/2}^n\left(N_i^n - N_{i-1}^n\right)\right],$$

где $D_{i\pm1/2}^n = \frac{1}{2}\left[D(N_{i+1}^n) + D(N_{i-1}^n)\right]$.

Схема обладает условной устойчивостью, определяемой критерием Куранта-Фридрихса-Леви:

$$\Delta_t \le \frac{\Delta x^2}{2max(D)}.$$

При высоких концентрациях $D(N)$ резко возрастает, что требует значительного уменьшения $\Delta_t$ и увеличивает время счёта.

### 3.2. Неявная схема (метод прогонки)

В соответствии с физикой процессов в кремнии, концентрационная зависимость часто аппроксимируется выражением:

$$D(N) = D_0 \left[1 + \left(\frac{N}{n_i}\right)^{\gamma}\right],$$

где $n_i$ — собственная концентрация носителей, γ — коэффициент поля, принимающий значения 1 или 2. При γ=2 учитывается влияние внутреннего электрического поля и двойная ионизация вакансий.

Как подчёркивается в [1], именно этот член ответственен за «вытягивание» профиля диффузии вглубь пластины при формировании сверхглубоких или высоколегированных эмиттеров. Согласно данным Гусева В. и Миливидского М. [3], такой вид зависимости характерен для диффузии бора в кремнии при высоких уровнях легирования. Экспериментальные профили, приведённые в [4], также подтверждают необходимость учёта квадратичного члена для корректного описания «вытягивания» профиля вглубь пластины.

## 4. Сравнительный анализ и физическая интерпретация

Для учёта концентрационной зависимости коэффициента диффузии в численном решении использовалась явная конечно-разностная схема, описанная в разделе 3.1. Пространственная область разбивалась на 200 узлов с шагом $\Delta x$=0,05 мкм, временной шаг $\Delta_t$ выбирался из условия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви. Коэффициент диффузии задавался в виде $D(N)=D_0[1+ (N/n_i)^2]$, что соответствует влиянию внутреннего электрического поля и учитывает особенности диффузии бора при высоких концентрациях, рассмотренные в работах. Начальные и граничные условия соответствовали описанным в разделе 1. Для наглядного подтверждения теоретических выкладок было проведено моделирование процесса диффузии при высокой поверхностной концентрации $Ns = 10^{20}$ см$^{-3}$.

Результаты расчёта профилей распределения концентрации приведены на рис.1.

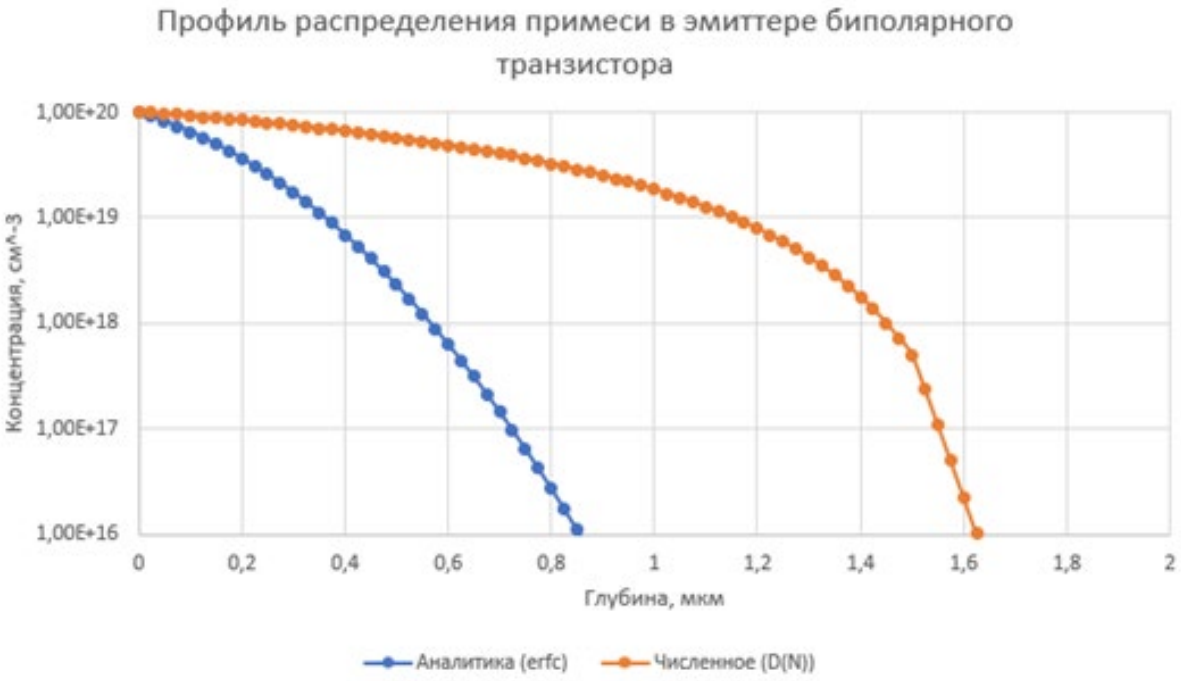



*Рис. 1 – Сравнение профилей легирования, полученных аналитическим и численным методами*

Как видно из графика, аналитическое решение (синяя кривая) даёт более крутой спад концентрации и предсказывает глубину проникновения примеси порядка 0,8–0,9 мкм. Численное решение (оранжевая кривая), учитывающее рост коэффициента диффузии $D(N)$, демонстрирует значительно более пологий профиль и глубину залегания около 1,6 мкм. Это подтверждает, что использование постоянной $D$ в условиях сильного легирования приводит к существенному занижению глубины *p-n* перехода (почти в 2 раза).

Кроме того, была оценена погрешность аналитического метода относительно численного эталона (рис.2).

График показывает, что ошибка аналитического метода нарастает экспоненциально по мере удаления от поверхности. В области, где находится p-n переход, погрешность достигает критических значений, делая аналитическую модель непригодной для точного проектирования геометрии транзистора.

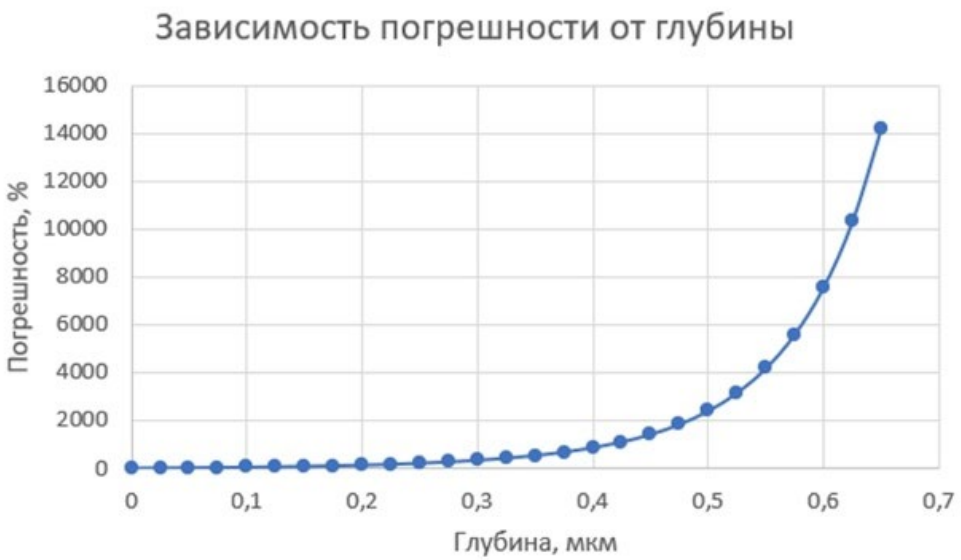



*Рис. 2 – Зависимость погрешности расчета от глубины*

Полученные результаты демонстрируют принципиальные различия между двумя подходами к моделированию. Для систематизации основных характеристик методов целесообразно представить их сравнение в таблице 1, что позволит наглядно оценить преимущества и ограничения каждого подхода при решении практических задач технологического проектирования.

*Таблица 1*

Основные характеристики методов

| **Параметр** | **Аналитическое решение (D = const)** | **Численное решение (D(N))** |
|---|---|---|
| Форма профиля | Гладкое экспоненциальное затухание (erfc) | «Корытообразный» профиль с крутым фронтом |
| Глубина перехода $x_i$ | Занижена на 10–50% в зависимости от Ns | Соответствует экспериментальным данным |
| Вычислительная стоимость | Мгновенный расчёт | Зависит от схемы: явная — быстро, но неустойчива; неявная — требует обращения матрицы |
| Применимость | Учебные задачи, экспресс-оценки, низкие Ns | Современное технологическое проектирование, САПР процессов |

С точки зрения физики транзистора, использование постоянной $D$ приводит к ошибке в расчёте ширины базы $W_B$ (ширина базовой области биполярного транзистора, см) и, как следствие, коэффициента усиления по току $\beta=\tau_B/\tau_E$ ( $\beta$ — коэффициент усиления по току биполярного транзистора, $\tau_B$ - время жизни неосновных носителей заряда в базе, $\tau_E$ - время жизни неосновных носителей в эмиттере**)** . Как отмечает Степаненко [2], даже 5% отклонение в профиле легирования эмиттера существенно меняет напряжение пробоя $BV_{EV0}$ (напряжение пробоя перехода эмиттер–база (*Emitter–Base Breakdown Voltage*), В) и частотные свойства прибора. Численное моделирование с учётом $D(N)$ позволяет оптимизировать температурно-временной режим диффузии,

минимизируя эффект «выталкивания» базы и обеспечивая воспроизводимость параметров партии.

**5. Вывод**

Аналитическое решение уравнения диффузии с $D$=const пригодно только для экспресс-оценок при умеренных концентрациях бора. При высоких поверхностных концентрациях ($Ns>10^{-19}$ см$^{-3}$) пренебрежение зависимостью $D(N)$ приводит к занижению глубины p-n перехода на 10–30%, поэтому необходимо применять численные методы. Конечно-разностное моделирование с учётом нелинейности коэффициента диффузии и внутреннего электрического поля обеспечивает точное воспроизведение реальных профилей легирования. Для технологического проектирования рекомендуется неявная разностная схема с алгоритмом прогонки, сочетающая устойчивость и высокую точность, что позволяет оптимизировать режимы диффузии и повысить воспроизводимость параметров биполярных транзисторов.

**Библиографический список**

1. Фридрихов С.А., Мовнин С.М. Физические основы электронной техники. — М.: Высшая школа, 1978. — 432 с.
2. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — М.: Энергия, 1973. — 496 с.
3. Гусев В.Г., Миливидский М.В. Физическая электроника полупроводниковых материалов. — М.: Радио и связь, 1986.
4. Fair R.B. Concentration Profiles of Diffused Dopants in Silicon. J. Electrochem. Soc., 1981, Vol. 128, No. 2, pp. 345–351.

© Тимергалиева К.Ю., Даутова А.Э., 2026

УДК 621.317

Т.З. ДЕЛОВЕРОВ
*deloverov.timur.03@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Аннотация.* В статье рассматривается электронный измерительный тракт волоконно-оптического датчика, предназначенного для измерения радиального зазора лопаток газотурбинного двигателя. Выполнено моделирование процесса

преобразования оптического сигнала в электрический, проведён расчёт параметров усилительного каскада и оценены метрологические характеристики системы. Исследовано влияние шумов и параметров аналого-цифрового преобразования на точность измерений.

*Ключевые слова:* электронный измерительный тракт, фотодиод, трансимпедансное преобразование, аналого-цифровое преобразование, шум, чувствительность, волоконно-оптический датчик.

***Введение***

Контроль радиального зазора лопаток газотурбинного двигателя является важной задачей, влияющей на эффективность его работы. Волоконно-оптические датчики позволяют выполнять измерения в условиях высоких температур и электромагнитных помех. При этом точность измерения определяется характеристиками электронного измерительного тракта, обеспечивающего преобразование и обработку сигнала [1].

***Математическая модель преобразования сигнала***

Преобразование оптической мощности в электрический сигнал осуществляется фотоприёмником [2]. Выходной ток фотодиода определяется зависимостью:

$$I_ф=R_λ \cdot P+I_T,$$

где $R_λ$ – спектральная чувствительность фотодиода, P – оптическая мощность, $I_T$ – тёмный ток фотодиода.

В рамках анализа принимается, что тёмный ток значительно меньше сигнальной составляющей и может рассматриваться как источник шума. Преобразование тока в напряжение осуществляется посредством трансимпедансного преобразования [3]:

$$U_{вых}=I_ф \cdot R_f,$$

где $R_f$ – эквивалентное сопротивление преобразующего каскада.

***Расчёт уровней сигнала***

Рассмотрим характерный уровень оптической мощности на входе фотоприёмника:

$$P=40 \text{ мкВт}.$$

При чувствительности фотодиода:

$$R_λ=0{,}5 \frac{А}{Вт}.$$

Получаем:

$$I_ф = 20 \text{ мкА}.$$

При выборе коэффициента преобразования:

$$R_f=100 \text{ кОм}.$$

Выходное напряжение составляет:

$$U_{вых}=2В.$$

Полученный уровень сигнала соответствует диапазону входных напряжений типичных аналого-цифровых преобразователей [4].

***Анализ шумов измерительного тракта***

Ключевым фактором, определяющим точность измерения, является уровень шумов. Дробовой шум фототока определяется выражением:

$$i_{shot}=\sqrt{2qI_{ф}\Delta f},$$

где $i_{shot}$ – среднеквадратическое значение дробового шума, q – заряд электрона, $\Delta f$ – полоса пропускания.

Тепловой шум определяется выражением:

$$i_{thernal}=\sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_f}},$$

где $i_{ithernal}$ – среднеквадратическое значение теплового шума, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Суммарный шум определяется как:

$$i_{\Sigma}=\sqrt{i_{shot}^2+i_{thernal}^2+i_{op}^2},$$

где $i_{op}^2$ – шум операционного усилителя.

***Аналого-цифровое преобразование***

Разрешение аналого-цифрового преобразователя определяется:

$$\Delta U=\frac{U_{ref}}{2^n},$$

где $U_{ref}$ – опорное напряжение, n – разрядность АЦП.

Квантовая погрешность:

$$\Delta U_{кв}=\frac{\Delta U}{\sqrt{12}},$$

где $\Delta U_{кв}$ – среднеквадратичное значение квантовой погрешности.

***Оценка погрешности измерения***

Чувствительность определяется как:

$$S=\frac{dU_{вых}}{dd},$$

где d – зазор лопатки газотурбинного двигателя.

Погрешность измерения:

$$\Delta d=\frac{\sqrt{\Delta U_{ш}^2+\Delta U_{кв}^2}}{S},$$

где $U_{ш}$ – шумовая составляющая напряжения.

***Заключение***

В работе выполнено моделирование электронного измерительного тракта волоконно-оптического датчика. Проведён расчёт уровней сигнала, выполнен анализ шумов и оценена погрешность измерений [5]. Показано, что точность системы определяется параметрами фотоприёмника, коэффициентом преобразования и характеристиками аналого-цифрового преобразования.

**Библиографический список**

1. Зак Е.А. Волоконно-оптические датчики. - М.: Радио и связь, 1990. - 192 с.

2. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1989. - 504 с.

3. Бадеева Е.А. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом. – М.: МГУЛ, 2004. - С. 68-70, 181-186.

4. Минеев А.В., Ясовеев В.Х. Вопросы измерений радиальных зазоров. В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.М. Шляндина. 2018. С. 55-58.

5. Минеев А.В., Ясовеев В.Х. Аналитическая модель измерительного оптико-электронного зонда малых аксиальных перемещений. Автометрия. 2021. Т. 57 №1. С. 80-91.

© Деловеров Т.З., 2026

УДК 681.586

А.Г. ФЕДОТОВ
*vvfxx94@gmail.com*
Науч. руковод. – д-р техн. наук, проф. В.Х. ЯСОВЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## АНАЛИЗ И МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В ГИДРОЦИЛИНДРЫ

*Аннотация*. В данной статье проводится анализ влияния температуры на точность работы магнитострикционных датчиков положения, интегрированных в гидроцилиндры. Рассматривается возникновение погрешности, связанной с изменением модуля сдвига материала волновода. Предложен комплексный подход к термокомпенсации, включающий программную коррекцию на основе многоточечного мониторинга температуры для учета теплового градиента

вдоль корпуса, применение специализированных сплавов и аппаратно-программный метод самокалибровки по реперному интервалу.

*Ключевые слова*: гидроцилиндр, магнитострикционный датчик положения, температурная погрешность, волновод, модуль сдвига, термокомпенсация.

***Введение***

Современные гидравлические системы требуют прецизионного контроля положения исполнительных механизмов. Магнитострикционные датчики положения (МДП) стали стандартом для гидроцилиндров благодаря возможности интеграции в гидроцилиндр и высокой устойчивости к давлению [1].

Однако, точность МДП существенно ограничена температурным фактором. В процессе эксплуатации, гидроцилиндр подвергается интенсивному нагреву изнутри рабочей жидкостью. Температурное воздействие изменяет физические свойства материала волновода, что ведет к нестабильности скорости ультразвуковой волны, вследствие чего возникает погрешность.

Целью данной статьи является анализ причин возникновения температурной погрешности и поиск способов её снижения, за счет выбора материалов волновода, использования программной коррекции и применения конструктивных решений с опорным магнитом.

***Физические основы возникновения температурной погрешности***

В основе работы МДП лежит преобразование перемещения во временной интервал, пропорциональный прохождению ультразвуковой волны от момента создания до его приема с помощью прямого и обратного магнитострикционных эффектов. Математически данное расстояние описывается формулой:

$$x = v \cdot t\,,$$

где, $x$ — расстояние, пройденное ультразвуковой волной от подвижного измерительного магнита до считывающего устройства, соответствующее текущему положению поршня; $v$ — скорость распространения ультразвуковой волны в материале волновода; $t$ — время от момента формирования импульса до его считывания.

Скорость крутильной ультразвуковой волны в твердом теле определяется физическими параметрами материала:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где $G$ — модуль сдвига материала; ρ —плотность материала.

При изменении температуры волновода, зависящей от рабочей жидкости, оба параметра претерпевают изменения. Однако, согласно справочным данным, температурный коэффициент модуля сдвига на порядок превосходит коэффициент теплового расширения, определяющий изменение плотности [2]. Таким образом, основным фактором, вызывающим погрешность преобразования, является термическое изменение модуля сдвига, приводящее к

вариации скорости ультразвуковой волны и неверному определению положения поршня.

***Программная коррекция и многоточечный мониторинг температуры***

В реальных условиях эксплуатации гидроцилиндра возникает проблема температурного градиента: шток и корпус нагреваются неравномерно из-за циркуляции горячей рабочей жидкости, возникновения застойных зон или воздействия внешних источников тепла. Использование единственного датчика температуры приводит к ошибкам, так как он фиксирует локальное значение, которое может отличаться от температуры волновода по всей его длине. Для решения этой проблемы применяется многоточечный мониторинг.

Алгоритм коррекции базируется на сегментации волновода. Итоговое положение рассчитывается исходя из среднего значения скорости ультразвука вдоль пройденного пути:

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{n} v(T_i) l_i \ ,$$

где $v_{\text{ср}}$ — среднее расчетное значение скорости ультразвуковой волны на всем диапазоне преобразования; L — полная длина волновода; $v(T_i)$ — локальная скорость ультразвуковой волны в $i$-м сегменте, рассчитанная исходя из его температуры $T_i$; $l_i$ — длина $i$-го участка волновода, соответствующая зоне контроля конкретного термодатчика; $n$ — общее количество точек измерения температуры вдоль корпуса гидроцилиндра.

На основе показаний датчиков программно выстраивается кривая температурного профиля, что позволяет корректировать результат измерения в каждой точке хода поршня. Такой подход позволяет снизить погрешность без усложнения механической части датчика.

***Исследование материаловедческих решений***

Одним из наиболее эффективных способов снижения температурной погрешности является применение прецизионных сплавов с особыми упругими свойствами. Как было сказано выше, основной вклад в дрейф показаний вносит изменение модуля сдвига. Для минимизации этого влияния в волноводах МДП используются элинварные сплавы [3].

В качестве эталона для сравнения рассмотрим чистый никель, обладающий выраженными магнитострикционными свойствами, но крайне высокой чувствительностью к температуре. При нагреве модуль сдвига никеля интенсивно снижается, что приводит к погрешностям преобразования. Для решения данной задачи можно использовать сплавы из группы элинваров, например, 36НХТЮ.

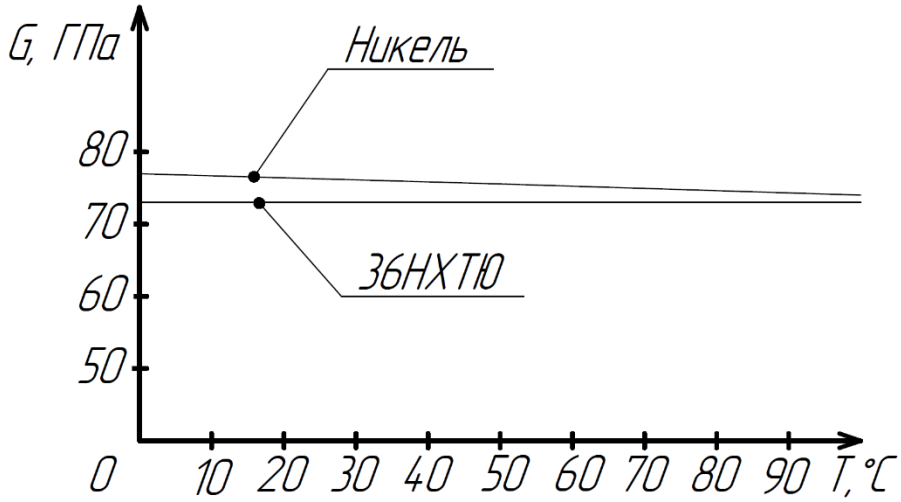



*Рис. 1.* Зависимость модулей сдвига никеля и 36НХТЮ от температуры

Как видно из приведенного графика (см. рис. 1), в то время как чистый никель в диапазоне 0–100°С теряет до 3,5% своей жесткости, модуль сдвига сплава 36НХТЮ в тех же условиях практически не меняется [4].

Важно отметить, что характеристики элинварных сплавов не являются статичными. В зависимости от химического состава и применяемых методов изготовления свойства материала могут быть подобраны под различные температурные режимы в соответствии с конкретными потребностями эксплуатации измерительного оборудования.

Таким образом, использование материалов с подобными физическими свойствами позволяет эффективно решить проблему температурной погрешности МДП, связанную с нестабильностью модуля сдвига, обеспечивая высокую точность измерений вне зависимости от условий нагрева рабочей среды.

***Метод самокалибровки по реперному интервалу***

Для обеспечения высокой точности измерений в условиях значительных температурных колебаний, характерных для работы гидроцилиндров, одним из наиболее эффективных методов компенсации температурного дрейфа является использование опорного магнита в конструкции преобразователя [5]. Данный подход позволяет перевести задачу стабилизации точности из плоскости материаловедения в область аппаратно-программной коррекции параметров измерительного тракта, обеспечивая адаптивность системы к изменяющимся внешним условиям. Принцип реализации данного метода наглядно представлен ниже на рис. 2.

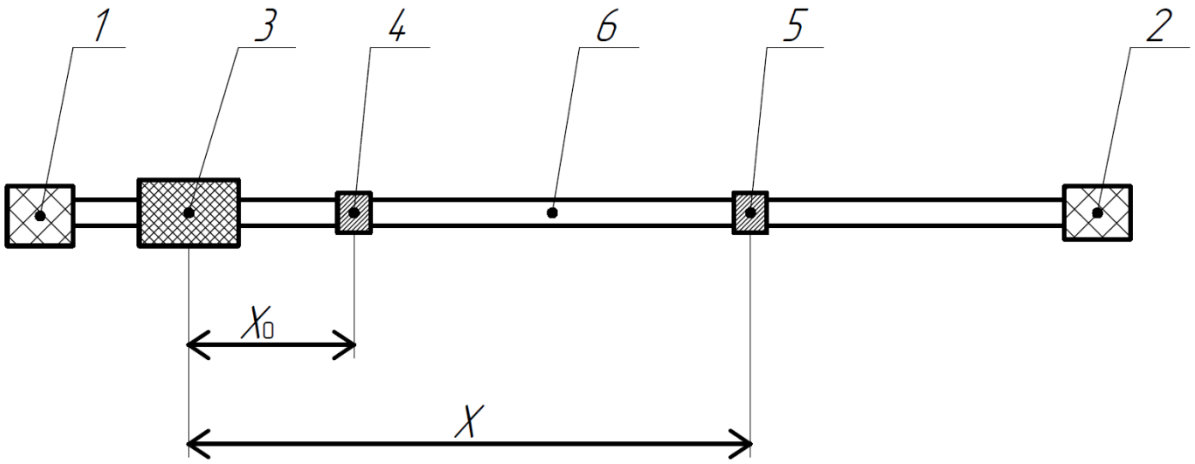



*Рис. 2*. Конструктивная схема МДП с опорным магнитом. 1 и 2 — демпферы для поглощения акустической энергии; 3 — считывающее устройство для фиксации импульсов; 4 — неподвижный опорный магнит; 5 — подвижный магнит; 6 — волновод.

Конструкция устройства включает в себя волновод, на обоих концах которого установлены специализированные демпферы. Их основная задача заключается в поглощении энергии ультразвуковой волны, что предотвращает возникновение отраженных волн и исключает их наложение на полезный сигнал. В головной части датчика расположено считывающее устройство, предназначенное для регистрации ультразвуковых импульсов, распространяющихся по волноводу. Ключевым элементом предложенной схемы является наличие двух независимых источников магнитного поля, сигналы от которых фиксируются считывающим элементом: неподвижного опорного магнита, расположенного на заранее известном расстоянии $x_0$, и подвижного измерительного магнита, расстояние до которого необходимо определить в процессе работы [6].

Функционирование системы базируется на принципе непрерывного мониторинга физического состояния волновода. Поскольку скорость звука в материале нестабильна и напрямую зависит от температуры, программная часть системы в каждом цикле измерения выполняет двухэтапный расчет:

1. Скорость ультразвуковой волны во время преобразования. Она вычисляется по формуле:

$$v_0 = \frac{x_0}{t_0},$$

где $v_0$ — скорость волны во время преобразования; $x_0$ — известное расстояние до опорного магнита; $t_0$ — время прохождения крутильной волны от опорного магнита до считывающего устройства.

2. Полученное значение $v_0$ используется для определения положения измерительного магнита по формуле:

$$x = v_0 \cdot t\,.$$

Если объединить оба этапа, то получим, что расчет выполняется на основе соотношения временных интервалов:

$$x = x_0 \cdot \frac{t}{t_0}.$$

В результате скорость ультразвуковой волны в волноводе исключается из алгоритма расчета. Следовательно, точность измерения почти не зависит от физических свойств волновода, а определяется совершенством конструктивных решений и алгоритмов обработки сигналов.

***Заключение***

В данной статье были рассмотрены основные источники температурной погрешности МДП, главным из которых является изменение модуля сдвига. Предложен ряд решений для ее минимизации, начиная с многоточечного мониторинга температуры и использования особых сплавов для изготовления волноводов и заканчивая интеграцией в конструкцию реперного магнита.

## Библиографический список


1. Шмелев, А. А. Интеллектуальные технологии при разработке магнитострикционных преобразователей линейных перемещений / А. А. Шмелев, В. Х. Ясовеев // Актуальные проблемы науки и техники : материалы I Межвуз. науч.-техн. конф. с междунар. участием — Ижевск : ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2020. — С. 202–206.
2. Физические величины : справочник / под редакцией И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — Москва : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
3. Прецизионные сплавы : справочник / под редакцией Б. В. Молотилова. — Москва : Металлургия, 1974. — 448 с.
4. ГОСТ 14119–85. Сплавы с особыми упругими свойствами : технические условия. — Москва : Изд-во стандартов, 1986. — 12 с
5. Ясовеев, В. Х. Магнитострикционные волноводные преобразователи параметров движения: Развитие теории, исследование технических возможностей, развитие научной базы для проектирования: специальность 05.13.05 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ясовеев Васих Хаматович. — Уфа, 2002. — 351 с.
6. Ясовеев, В. Х. Влияние параметров компенсационных обмоток на погрешность магнитострикционных преобразователей перемещения / В. Х. Ясовеев, Р. Ю. Мукаев, Р. Р. Исхаков. — Текст : непосредственный // Датчики и системы. — 2003. — № 12. — С. 21–24.


© Федотов А.Г., 2026

УДК 621.3.049.75

Э.Т. ГЕЙДАРОВ
*eduardgejdarov@gmail.com*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент. И.Е. ЧЕЧУЛИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПАРАЗИТНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ В СВЧ-ПЛАТАХ

*Аннотация*. В статье проводится анализ паразитных явлений в высокоскоростных печатных платах на основе методологии Г. Джонсона. Рассмотрено влияние времени нарастания фронта сигнала на возникновение СВЧ-эффектов, а также роль паразитной емкости и индуктивности в искажении формы импульса. Описаны практические методы снижения перекрестных помех через оптимизацию стека слоев и геометрии трасс.

*Ключевые слова*: высокоскоростные печатные платы, частота излома, время нарастания, паразитная индуктивность, паразитная емкость, перекрестные помехи, контроль импеданса, стек слоев, экранирование.

## СУЩНОСТЬ «ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ» ЭФФЕКТОВ

При проектировании печатных плат, на непрерывную работу электронного устройства влияет ее помехоустойчивость. Также большое влияние оказывает взаимное расположение пассивных элементов относительно друг друга и окружающей ее среды. На высоких частотах обычный печатный проводник может обладать значительной паразитной индуктивностью, что является проблемой в работе устройства.

Исходя из опытов Г. Джонсона и М. Грехема [1], при исследовании цифрового сигнала, можно сделать вывод. Чем короче фронт цифрового сигнала, тем выше верхняя граница частотного диапазона $F_{knee}$ (частота излома). На состояние сигнала влияет ее равномерная частотная характеристика, которая в свою очередь зависит от частотного диапазона, в котором она находится. Если частота сигнала будет превышать верхнюю границу, будут проявляться малые нелинейные искажения. Частота излома в свою очередь описывается формулой (1):

$$F_{knee} = \frac{0{,}5}{T_r}, \quad (1)$$

где $T_r$ – длительность фронта ступенчатого сигнала.

Длина соединительного проводника также существенно влияет на возникновение локализированных помех. Если длина проводника короче одной

шестой эффективной длины фронтов сигнала, то цепь начинает вести себя как система с сосредоточенными параметрами, такая зависимость описывается формулой (2):

$$l = \frac{T_r}{D}, \tag{2}$$

где $l$ – длина фронта сигнала,

$D$ – постоянная задержки, пс/мм.

Поэтому вводится понятие критической длины проводника, и при его пренебрежении печатный проводник превращается в линию с распределенными параметрами.

Исходя из выявления сущности высокоскоростных эффектов, большое влияние оказывает крутизна фронтов сигнала, когда даже схема с рабочей частотой 10 МГц и с короткими фронтами может выступать как СВЧ-устройство.

Далее рассмотрим влияние пассивных элементов на искажения формы сигнала.

1. Рассмотрим искажения цифрового сигнала емкостной нагрузкой с помощью установки, состоящей из генератора сигналов, осциллографа и тестируемой площадки, изображенных на рис. 1.

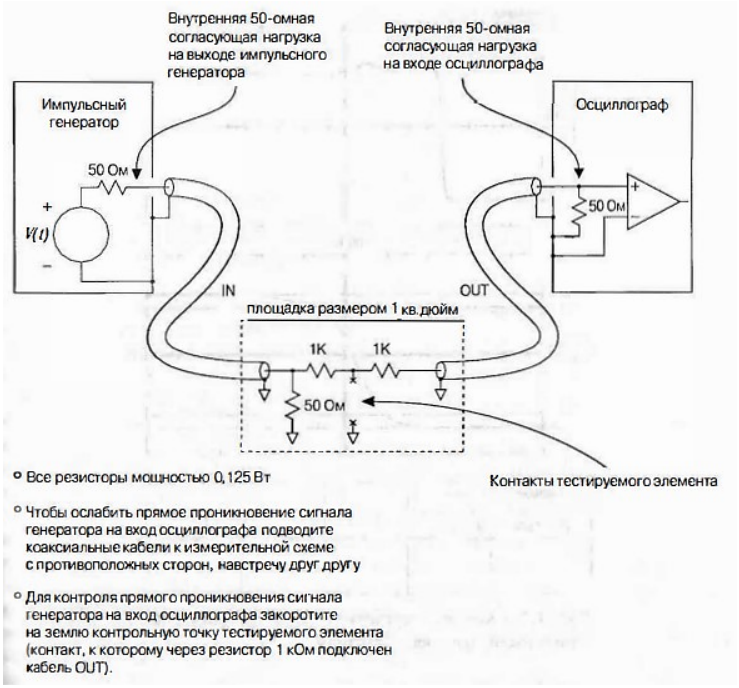



*Рис. 1* Лабораторная установка для измерения малых емкостей по 50-омной схеме измерения.

Взаимное расположение контактов тестируемого элемента влияет на возможность возникновения паразитных емкостей. В диапазоне наблюдения, начиная с 800 пс и заканчивая 40 пс, тестируемый элемент ведет себя как идеальная емкость.

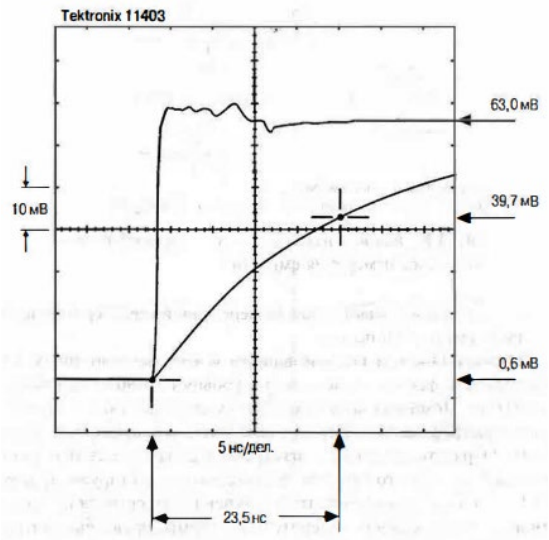



*Рис. 2* Определение постоянной времени RC-цепи по уровню 63 % установившегося значения.

Рассчитанная по формуле (3) и представленная на рис. 2 постоянной времени цепи емкость элемента составляет 46,7 пФ

$$C = \frac{\tau}{R}. \tag{3}$$

Постоянная времени *RC*-цепи – это время, за которое нарастающий фронт сигнала поднимается до уровня 63 %, а спадающий фронт сигнала снизится до уровня 37 %, амплитуды сигнала. При дальнейшей оценки реактивного сопротивления необходимо воспользоваться формулой, связанной с длительностью фронта, представленной на формуле (4):

$$X_C = \frac{T_r}{\pi C}. \tag{4}$$

При анализе установившегося значения (см. рис. 2) фронт импульса составляет 3 нс, а реактивное сопротивление конденсатора, примерно будет равно 20,44 Ом. Таким образом, при использовании микросхемы ТТЛ-формирователя с выходным импедансом 30 Ом такой конденсатор существенно будет искажать форму сигнала, увеличивая длительность фронтов.

2. Для анализа поведения индуктивности в шинах заземления и коротких соединительных проводах, по схожему принципу (см. рис. 2) была спроектирована измерительная установка для оценки падения напряжения на индуктивности вывода ($L_{\text{пр}}$).

Согласно закону электромагнитной индукции, напряжение на индуктивности пропорционально скорости изменения тока (5):

$$u = L\frac{di}{dt}. \tag{5}$$

При переключении логического элемента с временем нарастания, скорость изменения тока может достигать огромных значений. Исходя из методики Джонсона [1], эффективное реактивное сопротивление

индуктивности для высокочастотных составляющих фронта определяется по формуле (6):

$$X_L = \frac{\pi L}{T_r}. \quad (6)$$

Из-за наличия паразитной индуктивности в контуре возвратного тока возникает переходный процесс в виде затухающих колебаний – «звона». Если индуктивность перехода или вывода микросхемы слишком велика, амплитуда «звона» может превысить порог переключения логики, что приведет к ложному срабатыванию устройства.

Для минимизации этого эффекта необходимо стремиться к уменьшению магнитного потока, охватываемого контуром проводника [2].

## МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ

Цифровые трассы прокладываются над земляной поверхностью для исключения перекрестных помех, возникающих из-за быстрого нарастания скорости цифрового сигнала в цепи. Поэтому желательное расположение таких цепей в следующих структурах слоёв (рис. 3).

1. SIG+PWR (Top): Верхний слой для размещения компонентов, сигнальных дорожек и основных линий питания.

2. GND (Inner 1): Внутренний слой заземления («земляной полигон»). Сплошная медь для экранирования и стабильного возврата тока.

3. GND (Inner 2): Также является внутреннем слоем заземления. Использование двух слоев GND подряд (GND/GND) в центре платы создает отличную емкостную связь и минимизирует электромагнитные помехи.

4. SIG+PWR (Bottom): Нижний слой печатной платы, применяемый также для сигналов и питания.

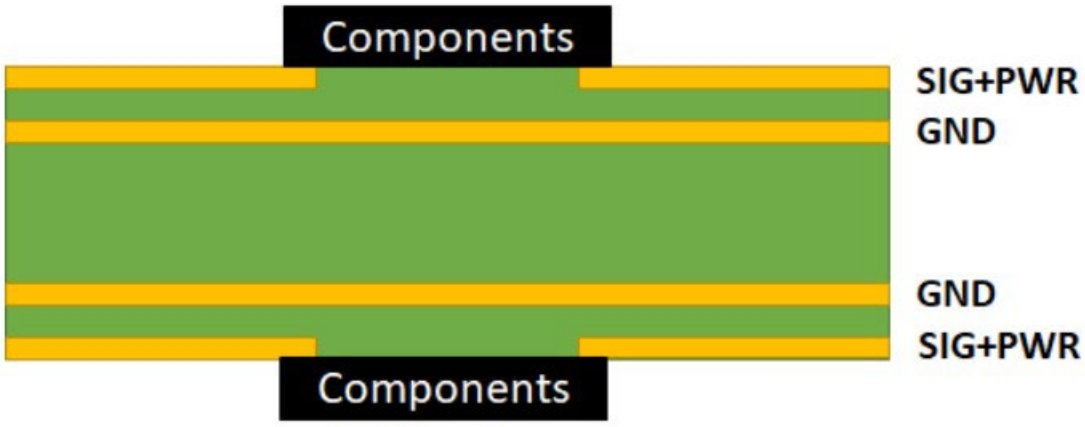



*Рис. 3* Стеки SIG+PWR/GND/GND/SIG+PWR

Такая конфигурация обеспечивает определённое сопротивление в пределах 50 Ом и применима для стандартизированных интерфейсах [3].

Для последующего уменьшения влияния перекрестных помех используются следующие техники:

1. Увеличения расстояние между трассами. В трассах, где печатные проводники расположены ближе друг к другу, электрические и магнитные поля будут сильнее. Следовательно, любые перекрестные помехи в таких трассах также будут сильнее. Существует правило «3*W*» – расстояние между двумя трассами должно быть, как минимум в 3 раза больше ширины трасс.

2. Минимизация длины параллельных трасс. Перекрестные помехи между двумя трассами увеличиваются, когда две трассы идут параллельно друг другу.

3. Использования меньшего расстояния трасс до земли. Если приблизить земляные плоскости, уменьшив толщину диэлектрика на 50%, а затем изменить размер дорожек, чтобы достичь той же цели по импедансу, получиться значительное снижение номинальных перекрестных помех.

## ФАКТОРЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

1. Одним из критически важных факторов является контроль импеданса в СВЧ-цепях. Это совокупность мер для строго заданного значения волнового сопротивления, предназначенных для минимизации отражения сигнала и потери мощности. Контроль импеданса осуществляется с помощью рефлектометра, который позволяет найти разрывы и несоответствия импеданса.

2. Геометрия проводника напрямую определяет его импеданс. Незначительные отклонения при производстве могут существенно изменить характеристики СВЧ цепи. На это влияет:

– уменьшение ширины проводника, которая ведет к увеличению импеданса;

– изменение расстояния до плоскости заземления напрямую меняет емкость линии передачи, следовательно, и импеданс;

– выбор диэлектрика, так как диэлектрическая проницаемость влияет на нестабильность материала по частоте и потерям.

3. Применение экранирования СВЧ-цепей. Это комплекс методов защиты высокочастотных электронных компонентов и трактов от воздействия внешних электромагнитных помех, а также предотвращение излучения паразитных сигналов самим устройством. На СВЧ-частотах экранирование становится критически важным из-за высокой чувствительности цепей и значительного излучения энергии. Применяется локальное экранирование путем разделения различных узлов печатной платы, с помощью металлических крышек. Также применяется принцип «клетки Фарадея» вокруг отдельных интегральных схем [4].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование СВЧ печатных плат требует перехода от классической схемотехники к анализу электромагнитных взаимодействий. На основе методов

Г. Джонсона показано, что контроль времени нарастания фронта и минимизация паразитной индуктивности в контурах возвратного тока являются ключевыми факторами обеспечения целостности сигналов. Применение правильного стека слоев и соблюдение правил трассировки позволяет минимизировать перекрестные помехи и обеспечить стабильную работу высокоскоростных устройств в заданном частотном диапазоне.

## Библиографический список


1. Джонсон, Г. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: расчет и проектирование практических приемов / Г. Джонсон, М. Грэхем. – М.: Вильямс, 2006. – 624 с.
2. Позар, Д. М. Микроволновая инженерия / Д. М. Позар. – М.: Техносфера, 2017. – 704 с.
3. Crosstalk Elimination Techniques in Altium Designer (Электронный ресурс) // Altium Resources. – URL: https://resources.altium.com/ru/p/crosstalk-elimination-techniques-in-altium-designer (дата обращения: 19.04.2026).
4. Экранирование в СВЧ-устройствах (Электронный ресурс) // Интеллект и Технологии. – URL: https://intellektinteh.ru/jekranirovanie-v-svch-ustrojstvah/ (дата обращения: 19.04.2026).


© Гейдаров Э.Т., 2026

УДК 001.891.57:519.711

Р.Р. ГИЛЯЗИЕВ
*denisov.wordmix@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц., О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

# ФИЗИЧЕСКИЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ

*Аннотация*. Рассматривается схемотехническая реализация активного широкополосного постановщика помех с цифровым формированием спектра на базе ПЛИС/RFSoC и GaN-усилителей мощности. Приведены структурная схема передающего тракта, математические модели соотношения помеха/сигнал и анализ влияния элементной базы на эффективность подавления.

*Ключевые слова*: радиоэлектронная борьба, активный постановщик помех, цифровое формирование спектра, GaN-усилители мощности, соотношение помеха/сигнал, RFSoC, прямое преобразование частоты.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена переходом современных РЭС к широкополосным сигналам и когнитивным методам связи, снижающим эффективность традиционных средств подавления. К современным постановщикам помех предъявляются требования мгновенной полосы обзора до нескольких ГГц, высокой спектральной плотности мощности и программной реконфигурации сигналов в реальном времени.

Цель работы — анализ схемотехники и физических ограничений активного широкополосного постановщика помех с цифровым формированием спектра. В рамках исследования решаются задачи классификации средств РЭБ, описания физики взаимодействия помехи с целевой РЭС, разбора структуры передающего тракта, математического моделирования режимов работы и оценки влияния элементной базы на эффективность подавления.

Современные решения базируются на цифровых архитектурах, объединяющих генерацию волновых форм в ПЛИС, высокоскоростные ЦАП и GaN-усилители мощности, что обеспечивает адаптивное управление спектром. Однако открытые публикации преимущественно фокусируются на алгоритмах ЦОС и тактике применения, упуская вопросы согласования СВЧ-тракта, компенсации нелинейностей и теплового проектирования. Настоящая статья систематизирует схемотехнические решения, параметрические модели и перспективы развития активных средств РЭБ, восполняя указанный пробел.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Согласно Перунову Ю.М., Фомичеву К.И., Юдину Л.М [2], Устройства радиоэлектронной борьбы подразделяются на средства радиоэлектронной разведки (пассивные), средства радиоэлектронного подавления (активные) и комбинированные комплексы. Активные постановщики помех формируют электромагнитное излучение, предназначенное для снижения эффективности работы целевых РЭС за счёт нарушения нормального приёма, обработки или извлечения информации. По характеру воздействия они классифицируются на шумовые (заградительные, прицельные, скользящие) и имитационные (ретрансляционные, ложных целей, модуляционные). Цифровые системы позволяют синтезировать гибридные формы, сочетающие спектральную плотность шума с структурными признаками полезных сигналов.

Физический принцип подавления основывается на достижении критического соотношения мощности помехи к мощности полезного сигнала в полосе приёмника цели. Эффективность подавления определяется не только излучаемой мощностью, но и спектральным совпадением, поляризационным согласованием, временным перекрытием и пространственным направлением излучения. В условиях широкополосного подавления ключевой задачей становится формирование равномерной или адаптивно перераспределённой спектральной плотности мощности в заданной полосе при сохранении линейности тракта и минимизации внеполосных излучений.

Преобразование цифровых волновых форм в РЧ-сигнал требует выполнения условий Найквиста, управления фазовым шумом гетеродина, компенсации апертурных ошибок ЦАП и подавления гармоник. Физические ограничения полупроводниковых переходов проявляются в виде теплового шума, нелинейной компрессии, межсимвольной интерференции и спектрального уширения при высоких уровнях огибающей. В активных системах РЭБ эти эффекты критичны, поскольку искажение спектра помехи снижает её эффективность и повышает вероятность радиолокационного обнаружения постановщика. Теоретический анализ должен учитывать баланс между спектральной эффективностью, энергопотреблением и тепловой нагрузкой, определяющий предельные параметры излучаемой мощности и времени непрерывной работы [1].

## СХЕМОТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Структурная схема активного постановщика помех представляет собой каскад функциональных узлов, обеспечивающих цифровое формирование сигнала, цифро-аналоговое преобразование, частотное преобразование, линейное усиление и излучение. Сигнальный путь является однонаправленным от цифрового процессора к антенне с наличием обратных контуров калибровки и контроля(рис.1).

Иерархия начинается с программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) или RFSoC, где реализуются алгоритмы генерации волновых форм: цифровые шумовые последовательности (PN, LFSR), модулированные несущие, адаптивные спектральные маски и алгоритмы управления мощностью. Сформированные I/Q-потоки с разрядностью 12–16 [2] бит и частотой дискретизации 2–5 Гвыб/с передаются по высокоскоростным параллельным шинам в многоканальный ЦАП. ЦАП выполняется по архитектуре чередования или мультиплексирования с выходным дифференциальным токовым интерфейсом.

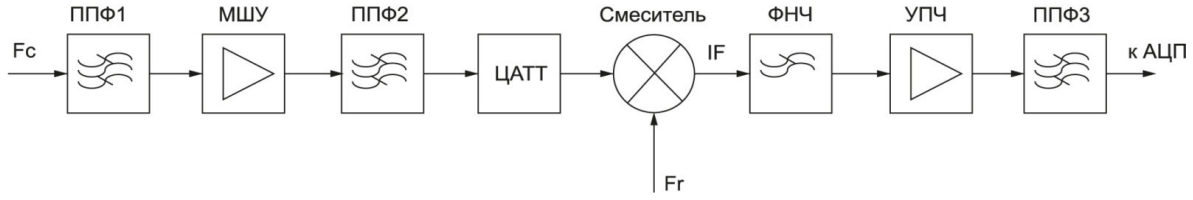



*Рис. 1 – Структурная схема устройства*

Выход ЦАП подключается к реконструирующему фильтру нижних частот на основе микрополосковых или керамических элементов, подавляющему зеркальные компоненты и спектральные копии до уровня не менее 60 дБ. Далее сигнал поступает на смеситель прямого или гетеродинного преобразования. В современных архитектурах предпочтительна схема прямого преобразования (Zero-IF) с квадратурными смесителями на GaAs/SiGe MMIC, что исключает гетеродинные зеркальные каналы и упрощает калибровку I/Q-баланса [2]. Локальный осциллятор формируется синтезатором частоты с

прямой цифровой синтезацией (DDS) и малошумящим PLL, обеспечивающим фазовый шум не хуже -100 дБн/Гц при отстройке 10 кГц.

После частотного преобразования сигнал поступает на предусилительный каскад, согласованный по импедансу 50 Ом, и далее на многокаскадный усилитель мощности. Ключевым элементом является твердотельный GaN-усилитель на основе высокоэлектронно-подвижных транзисторов (HEMT), обеспечивающий плотность мощности 5–10 Вт/мм, коэффициент усиления 10–15 дБ и точку сжатия 1 дБ на уровне +35…+45 дБм. Для достижения требуемой излучаемой мощности применяется каскадирование с сумматорами на основе магистральных ответвителей или пространственным комбинированием в активной фазированной антенной решётке [3].

Выходной каскад подключается к циркулятору или дуплексеру, обеспечивающему разделение передающего и приёмного (контрольного) трактов, защиту усилителя от отражённой мощности и контроль КСВН антенной системы. Антенно-фидерная система выполняется в виде широкополосной логопериодической антенны, рупорного излучателя или активной фазированной решётки с электронным управлением лучом. Точки согласования включают: ЦАП–фильтр (активное согласование дифференциального выхода), фильтр–смеситель (КСВН ≤ 1.3), предусилитель–GaN-УМ (согласование по мощности и линейности), GaN-УМ–циркулятор (импедансная стабилизация при перегрузке), циркулятор–антенна (подавление стоячих волн). Каждый узел требует контроля паразитных реактивностей, теплового расширения и целостности СВЧ-соединений.

## АНАЛИЗ РЕЖИМ РАБОТЫ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Оценка эффективности активного постановщика помех опирается на математические модели, описывающие энергетическое взаимодействие с целевой РЭС, эффективность преобразования мощности в усилителе и требования к спектральной чистоте излучения.

Первая формула определяет соотношение помеха/сигнал (J/S) в точке приёма целевого устройства:

$$J/S = \frac{P_i G_i \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2 \sigma} * \frac{B_r}{B_i} \qquad (1)$$

где $Pj$ — излучаемая мощность постановщика (Вт), $Gj$ — коэффициент усиления передающей антенны (линейный), $\lambda\lambda$ — длина волны рабочей частоты (м), $R$ — расстояние до цели (м), $\sigma\sigma$ — эффективная площадь рассеяния или эквивалентный параметр чувствительности приёмника цели, $Br$ — полоса пропускания приёмника цели (Гц), $Bj$ — эффективная полоса излучаемой помехи (Гц) [1]. Данная модель показывает, что для обеспечения заданного уровня подавления необходимо либо увеличивать $PjGj$, либо сужать $Bj$ до полосы приёмника цели, что требует точного спектрального согласования. При $Pj$ = 100 Вт, $Gj$ = 10, $R$ = 50 км, $\lambda$ = 0.03 м (10 ГГц), 1$Br$ = 1 МГц, $Bj$=100 МГц достигается $J/S$≈30 дБ, что соответствует зоне уверенного подавления большинства РЭС связи.

Вторая формула описывает коэффициент полезного действия усилителя мощности с учётом подводимой мощности:

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} * 100\% \quad (2)$$

где $P_{out}$ — выходная РЧ-мощность (Вт), $P_{in}$ — входная РЧ-мощность (Вт), PDC*PDC* — потребляемая мощность от источника питания (Вт). Для современных GaN-УМ в классе AB/B достигается PAE = 45–60%. Высокий PAE критически важен для мобильных и автономных систем РЭБ [2], поскольку снижает требования к источникам питания и объёму системы охлаждения. При $P_{out}$=200 Вт, $P_{in}$ = 2 Вт, *PAE*=50% потребляемая мощность составит *PDC* ≈ 396 Вт, из которых ≈196 Вт рассеивается в виде тепла, что требует расчёта тепловых переходов и выбора подложки с высокой теплопроводностью.

Третья модель характеризует требование к линейности и спектральной чистоте через уровень внеполосного излучения:

$$ACPR = 10log_{10}\left(\frac{P_{adj}}{P_{main}}\right) \quad (3)$$

где *ACPR* — отношение мощности в соседнем канале к мощности в основном канале (дБ), *Padj* — интегральная мощность в полосе прилегающего канала, *Pmain* — мощность в рабочей полосе. Для постановщиков помех допустимое значение ACPR составляет не хуже 30–40 дБ, чтобы избежать самозаглушения соседних приёмных каналов и минимизировать вероятность обнаружения по спектральным выбросам. Линейность тракта обеспечивается цифровой предыскажения (DPD), компенсацией AM-AM и AM-PM характеристик GaN-транзисторов и термостабилизацией рабочей точки [3].

**ВЫВОДЫ**

Проведённый анализ подтвердил технологическую целесообразность архитектуры активного широкополосного постановщика помех с цифровым формированием спектра и твердотельным GaN-усилением. Установлено, что эффективность подавления определяется не абсолютной излучаемой мощностью, а точностью спектрального согласования волновых форм, минимизацией джиттера тактовых цепей и компенсацией нелинейностей тракта методами цифровой предыскажения. Представленные математические модели соотношения помеха/сигнал, КПД усилителей и требований к внеполосному излучению позволяют на этапе проектирования оценивать предельные параметры системы и оптимизировать выбор элементной базы с учётом теплового и энергетического балансов.

Практическая значимость работы заключается в систематизации схемотехнических решений, обеспечивающих воспроизводимую работу широкополосного передающего тракта в условиях динамичной радиоэлектронной обстановки. Дальнейшее развитие направления связано с внедрением когнитивных алгоритмов адаптивного управления спектром, переходом к полностью цифровым активным фазированным решёткам и интеграцией фотонно-электронных модулей для расширения рабочей полосы в миллиметровые диапазоны. Реализация указанных мер позволит создать

следующее поколение активных средств РЭБ, характеризующихся высокой скоростью реакции, пространственной избирательностью и устойчивостью к противодействию когнитивных радиоэлектронных систем.

**Библиографический список**

1. Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М, Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием, 2008, 416 с. URL:https://studizba.com/show/1186261-8-perunov-yum-fomichev-ki-yudin-lm.html (дата обращения 30.04.2026)

2. Гарин Е. Н., Осипов А. С., Гладышев А. Б., Фомин А. Н., Михов Е. Д., Ермоленко Д. С., Серебринников С. В., Молчанов В. П., Зверев П. Ю., Бацылев В. М., Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов радиоэлектронного подавления: учебник, 2021, 478 с. URL: https://www.mediabooks.ru/%EF%BF%BCvoenno-texnicheskie-osnovy-postroeniya-sredstv-i-kompleksov-radioelektronnogo-podavleniya/ (дата обращения 30.04.2026) (дата обращения 23.11.2024)

3. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / Под ред. Ю.М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. – М.: Радиотехника, 2010. – 352 с. URL: http://radiotec.ru/ru/books/343 (дата обращения 30.04.2026)

© Гилязиев Р.Р., 2026

УДК 621.3.011.732.24

А.Р. ГРИГОРЬЕВ
toxagrigg@mail.ru
Науч. руковод. – доцент, канд. техн. наук О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРИНЦИП РАБОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ RC-ЦЕПЕЙ В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

*Аннотация.* В работе рассматриваются физические и математические основы работы резистивно-конденсаторных цепей. Выведены формулы переходных процессов заряда и разряда, обосновано понятие постоянной времени $\tau$. Проанализированы основные области применения RC-структур в современной электронике: таймеры, фильтры, устранение дребезга контактов, разделительные цепи. Приведён практический расчёт параметров схемы задержки и результаты моделирования в среде Scilab, подтверждающие теоретические вычисления.

*Ключевые слова:* RC-цепь; постоянная времени; переходный процесс; фильтр нижних частот; дребезг контактов; моделирование; Scilab; аналоговая электроника.

**Введение**

Электроника является одной из ключевых областей современной техники, лежащей в основе работы смартфонов, компьютеров, систем автоматизации, медицинских приборов и множества других устройств. Несмотря на стремительное развитие микропроцессорной техники и цифровых систем, базовые аналоговые элементы остаются фундаментом, без которого невозможно проектирование сложных электронных узлов. Среди таких базовых структур особое место занимает резистивно-конденсаторная цепь (RC-цепь), которая, несмотря на свою простоту, находит широкое применение в таймерах, фильтрах, цепях формирования сигналов и системах стабилизации.

Актуальность темы обусловлена тем, что понимание работы RC-цепей необходимо любому специалисту в области электроники, поскольку они используются как в учебных лабораторных установках, так и в промышленных устройствах. Многие современные интегральные схемы (например, таймер 555, операционные усилители, микроконтроллеры) опираются в своей работе на принципы, заложенные именно в RC-структурах.

Цель работы: изучить физический принцип работы RC-цепей, вывести их математическую модель и рассмотреть практические примеры применения в реальных электронных устройствах.

Задачи исследования:

1) описать назначение и свойства резистора и конденсатора в составе цепи;

2) проанализировать процессы заряда и разряда конденсатора через резистор;

3) ввести понятие постоянной времени $\tau$ и объяснить её физический смысл;

4) рассмотреть основные области применения RC-цепей в современной электронике;

5) выполнить практический расчёт параметров простейшей RC-схемы и интерпретировать полученные результаты.

Объект исследования: пассивные электронные компоненты и их совместная работа в линейных цепях.

Предмет исследования: временные и частотные характеристики последовательной RC-цепи.

**1. Теоретические основы RC-цепей**

RC-цепь представляет собой электрическую схему, состоящую из резистора (R) и конденсатора (C), соединённых последовательно или параллельно. В данной работе рассматривается классическая последовательная

RC-цепь, подключаемая к источнику постоянного или переменного напряжения.

Резистор ограничивает протекание тока и преобразует электрическую энергию в тепловую. Его сопротивление измеряется в омах (Ом) и подчиняется закону Ома:

$$U = I * R.$$

Конденсатор накапливает электрический заряд на своих обкладках, создавая между ними электрическое поле. Ёмкость конденсатора измеряется в фарадах (Ф) и определяется соотношением $C = \frac{Q}{U}$, где Q – заряд, U – напряжение. В цепи постоянного тока конденсатор в начальный момент пропускает ток, но по мере накопления заряда ток уменьшается и в идеальном случае стремится к нулю.

При подаче постоянного напряжения на последовательную RC-цепь возникает переходный процесс, в ходе которого напряжение на конденсаторе изменяется не мгновенно, а плавно. Это свойство широко используется в электронике для создания задержек, фильтрации помех и формирования сигналов определённой формы.

**2. Математическая модель и постоянная времени**

Поведение RC-цепи при заряде и разряде описывается дифференциальным уравнением первого порядка. Для цепи, подключённой к источнику постоянного напряжения E, закон Кирхгофа даёт:

$$U_0 = U_R + U_C = I * R + U_C.$$

Учитывая, что ток $I = \frac{C*dU_C}{dt}$, получаем:

$$U_0 = \frac{RC * dU_C}{dt} + U_C.$$

Решение этого уравнения при нулевом начальном напряжении на конденсаторе даёт выражение для напряжения на конденсаторе во времени:

$$U_C(t) = U_0 * \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right).$$

Аналогично, при разряде предварительно заряженного конденсатора через резистор:

$$U_C(t) = U_0 * e^{\frac{-t}{RC}}.$$

Ключевым параметром, определяющим скорость протекания этих процессов, является постоянная времени $\tau$ (тау):

$$\tau = R * C.$$

Физический смысл $\tau$ заключается в том, что за время, равное одной постоянной времени, конденсатор заряжается примерно до 63,2% от напряжения источника или разряжается до 36,8% от начального напряжения. Практически полный заряд или разряд (более 99%) достигается за время $t \approx 5\tau$.

В частотной области RC-цепь выступает в роли фильтра первого порядка. Частота среза $f_c$, на которой выходное напряжение падает до $\frac{1}{\sqrt{2}}$ от входного, определяется формулой:

$$f_c = \frac{1}{(2\pi * R * C)}.$$

При $f < f_c$ цепь пропускает низкочастотные сигналы (фильтр нижних частот), а при изменении точки съёма сигнала может работать как фильтр верхних частот.

**3. Практическое применение в электронике**

Несмотря на простоту конструкции, RC-цепи решают множество инженерных задач:

1. Таймеры и генераторы задержек. В цифровых устройствах часто требуется выдержать паузу перед подачей следующего импульса. RC-цепь в сочетании с компаратором или транзисторным ключом позволяет формировать задержку длительностью от микросекунд до десятков секунд. Пример: схема задержки включения питания микроконтроллера для стабилизации напряжения.

2. Фильтрация сигналов. RC-фильтры нижних частот широко применяются в аудиотехнике для подавления высокочастотных шумов, в системах питания для сглаживания пульсаций после выпрямителя, а также в датчиковых цепях для устранения высокочастотных помех.

3. Устранение дребезга контактов. Механические кнопки и переключатели при нажатии генерируют серию быстрых замыканий/размыканий (дребезг), что приводит к ложным срабатываниям цифровых систем. Параллельный конденсатор небольшой ёмкости (обычно 10–100 нФ) в сочетании с подтягивающим резистором формирует RC-цепь, которая «сглаживает» переходный процесс и обеспечивает стабильный логический уровень.

4. Разделительные и блокировочные цепи. В усилителях переменного тока конденсатор, включённый последовательно с сигналом, пропускает только переменную составляющую, отсекая постоянную. Это позволяет согласовывать каскады с разными рабочими точками без искажения полезного сигнала.

5. Цепи дифференцирования и интегрирования. При определённых соотношениях τ и периода входного сигнала RC-структура может выполнять математические операции над сигналом: интегрировать (выход пропорционален площади под кривой входа) или дифференцировать (выход пропорционален скорости изменения входа). Это используется в аналоговых вычислительных схемах и формирователях импульсов.

**4. Пример расчёта и моделирования**

Для закрепления теоретического материала выполним расчёт параметров простейшей RC-схемы задержки.

Исходные данные:

Сопротивление резистора: R = 47 Ом
Ёмкость конденсатора: C = 100 Ф
Напряжение питания: U = 5 В
Расчёт постоянной времени:

$$\tau = R * C = 47 * 10^3 \text{Ом} * 100 * 10^{-6} \Phi = 4{,}7 \text{ с}$$

Напряжение на конденсаторе через 2 с после подачи питания:

$$U_C(2) = 5 * \left(1 - e^{\frac{-2}{4.7}}\right) \approx 5 * (1 - e^{-0.425}) \approx 5 * (1 - 0.654) \approx 1.73 \text{ В}$$

Напряжение через 5 с:

$$U_C(4.7) \approx 5 * 0.632 \approx 3.16 \text{ В}$$

Время полного заряда (практически):

$$t_{\text{полн}} \approx 5\tau = 23{,}5 \text{ с}$$

Данный расчёт показывает, что при указанных номиналах схема обеспечит плавный рост напряжения с характерным временем нарастания около 5 секунд. В реальном устройстве такой параметр позволяет, например, постепенно включать светодиодную подсветку или формировать задержку сброса микроконтроллера.

Для проверки теоретических выводов было проведено моделирование в программной среде Scilab. Результаты моделирования полностью совпали с аналитическими расчётами: погрешность составила менее 1%, что подтверждает корректность применённых формул и допустимость использования линейной модели конденсатора для рассматриваемого диапазона частот и напряжений.

**Заключение**

В ходе выполнения исследовательской работы были изучены физические и математические основы работы RC-цепей, выведены формулы для расчёта переходных процессов, введено и обосновано понятие постоянной времени τ, а также рассмотрены основные области практического применения данных схем в современной электронике.

Можно сделать следующие выводы:

1. RC-цепь является простейшей, но чрезвычайно функциональной структурой, способной выполнять задачи временной задержки, фильтрации, формирования импульсов и согласования каскадов.

2. Постоянная времени τ однозначно определяет динамику цепи и позволяет инженеру заранее прогнозировать поведение устройства без сложных экспериментов.

3. Несмотря на развитие цифровых технологий и появление специализированных микросхем, дискретные RC-элементы остаются незаменимыми в цепях питания, датчиковой технике, аналоговой обработке сигналов и системах защиты от помех.

4. Базовое понимание работы RC-цепей необходимо для дальнейшего изучения более сложных аналоговых и цифро-аналоговых систем, включая

активные фильтры, операционные усилители и микроконтроллерные периферийные модули.

Перспективы дальнейшего исследования могут включать изучение нелинейных эффектов в реальных конденсаторах (ток утечки, эквивалентное последовательное сопротивление), анализ влияния температуры на параметры RC-цепей, а также проектирование активных фильтров на базе операционных усилителей с использованием пассивных RC-звеньев.

## Библиографический список

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3-х томах. Том 1. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2021. – 656 с.

2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство. – 12-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 832 с.

3. Седов А. С. Основы электроники и микроэлектроники: учебное пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2022. – 416 с.

4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2020. – 512 с.

5. Scilab Enterprises. Scilab 2026.1 Documentation: Signal Processing and Control Systems Toolboxes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.scilab.org/docs/2026.1/en_US/ (дата обращения: 15.04.2026).

6. Филимонов А. Б., Матросов А. В. Научные и инженерные расчёты в среде Scilab: учебное пособие. – М.: РУДН, 2023. – 184 с.

7. All About Circuits. RC Circuits and Time Constants: Textbook Chapter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-16/rc-circuits/ (дата обращения: 15.04.2026).

8. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – Введ. 2018-07-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 24 с.

© Григорьев А.Р., 2026

УДК 621.396.6

А.И. ИЛЬЯСОВА
albin-2019@list.ru
Науч. руководов. — канд. техн. наук, доцент О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ СРЕДСТВАМИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Аннотация. В* данной статье рассматривается исследование резонанса напряжений с применением средств схемотехнического моделирования в среде Multisim 14.1. Дано определение резонанса напряжений, приведены основные расчётные формулы и проанализированы особенности явления.

*Ключевые слова:* резонанс напряжений, электрическая цепь, компьютерное моделирование.

**Резонанс напряжений** — это явление резкого возрастания амплитуды тока и напряжений на реактивных элементах в электрической цепи с последовательным соединением индуктивности ($L$) и ёмкости ($C$), возникающее при совпадении частоты внешнего источника с собственной резонансной частотой контура. [3]

При резонансе напряжений:

– реактивное сопротивление цепи $X$ равно нулю;

– полное сопротивление цепи $Z$ становится минимальным и равным активному сопротивлению $R$: $Z = R$;

– ток в цепи достигает максимального значения: $I = \frac{U}{R}$;

– напряжения на катушке $U_L$ и конденсаторе $U_C$ могут во много раз превышать входное напряжение $U$.

Ключевые формулы для анализа резонанса напряжений в неразветвленных цепях с последовательным соединением индуктивного и емкостного элементов:

1. **Резонансная частота** (формула Томсона): $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
2. **Реактивные сопротивления**:

– индуктивное: $X_L = 2\pi f L$;

– ёмкостное: $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$

3. **Полное сопротивление цепи**: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
4. **Добротность контура** (показывает, во сколько раз напряжение на реактивных элементах превышает входное): $Q = \frac{\rho}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ — характеристическое сопротивление контура.

5. **Напряжения на элементах**:

– на резисторе: $U_R = I \cdot R$;

– на катушке: $U_L = I \cdot X_L$;

– на конденсаторе: $U_C = I \cdot X_C$;

Был использован пакет схемотехнического моделирования Multisim для анализа резонансного последовательного контура (*RLC*) (рис.1). [4]

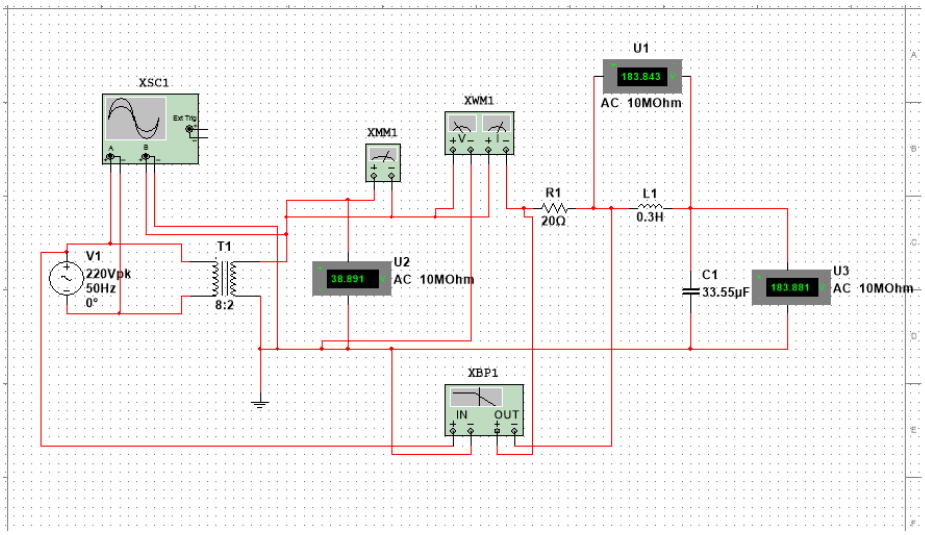



*Рис. 1* — Модель резонансного контура (RLC) в Multisim

Источник переменного напряжения (*V*1) создает электрические колебания с частотой 50 Гц. Трансформатор (*T*1) понижает высокое напряжение сети до безопасного рабочего уровня. Резистор (*R*1 = 20 Ом) ограничивает ток в цепи. Катушка индуктивности (*L*1, 0.3 Гн) и конденсатор (*C*1, 33.55 мкФ) для создания резонанса в последовательном контуре.

Вольтметр *U2* измеряет напряжение, подаваемое на вход резонансного контура со вторичной обмотки трансформатора.

Вольтметры *U1* и *U3* измеряют напряжение на катушке индуктивности и конденсаторе соответственно. По показания вольтметра *U2* и показаниями *U1* и U3 можно определить добротность контура.

Осциллограф (*XSC1*) показывает форму напряжения на входе и тока цепи и позволяет определить фазовый сдвиг между ними (рис.2).

Временные диаграммы (рис.2) иллюстрируют состояние идеального резонанса, при котором фазовый сдвиг между исследуемыми напряжениями равен нулю.

Мультиметр (*XMM1*) в режиме амперметра — измеряет общий ток в цепи. Ваттметр (*XWM1*) измеряет активную мощность (P, Вт).

Плоттер Боде (*XBP1*) — прибор для построения амплитудно-частотной (АЧХ) (рис.4) и фазочастотной характеристик (ФЧХ) (рис.4).

На Рис.3 изображена АЧХ. Виден острый пик, это и есть момент резонанса, контур практически идеально настроен на 50Гц.

На рис. 4 изображена ФЧХ. Линия графика резко падает вниз в районе 50 Гц, то есть при этой частоте сдвиг фаз между током и напряжение практически исчезает.

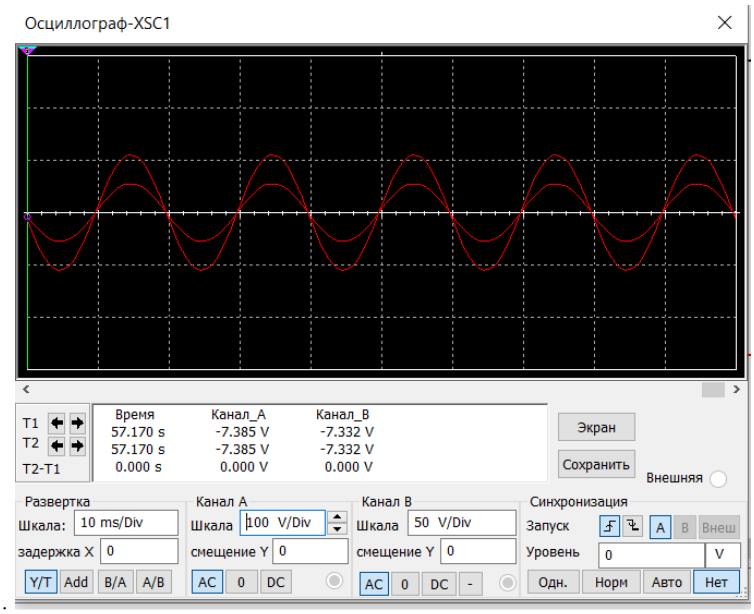



*Рис. 2*— Осциллограф

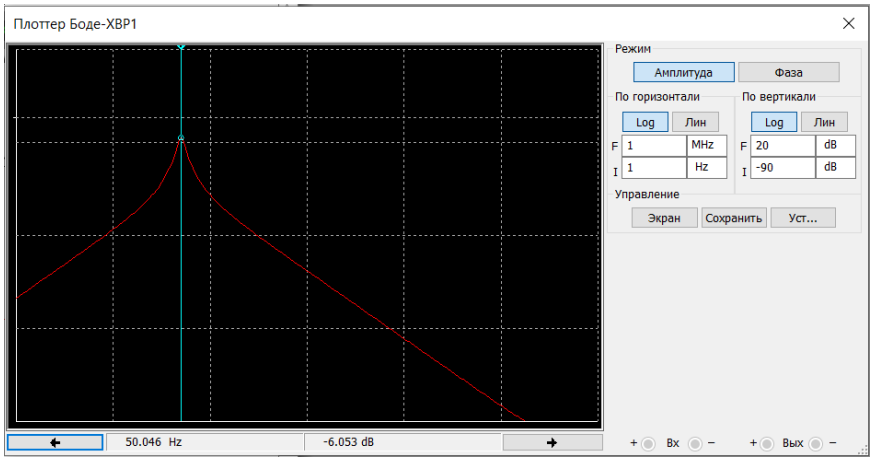



*Рис. 3*— Амплитудно-частотная характеристика

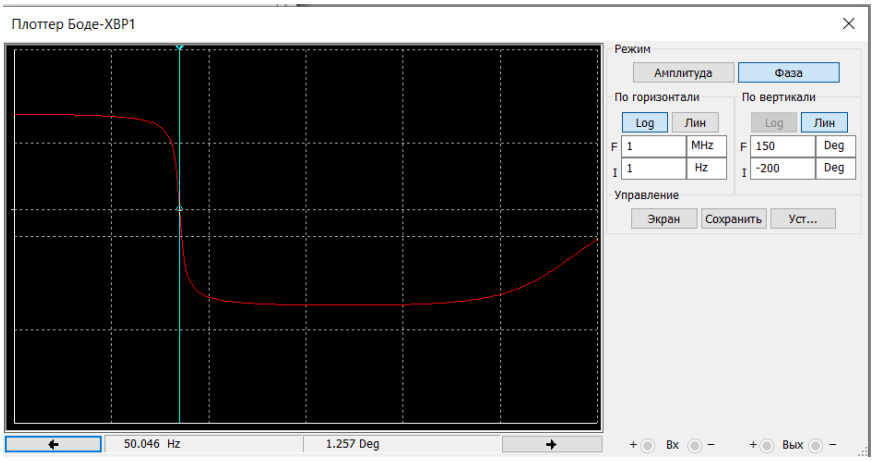



*Рис. 4*— Фазочастотная характеристика

Моделирование позволяет наглядно продемонстрировать явление резонанса и проверить теоретические расчёты (табл.1).

*Таблица 1*

Результаты измерений и вычислений

| Установленные величины | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $U_{вх}$, В | $R$, Ом | $L$, Гн | $C$, мкФ | |
| 38.89 | 20 | 0.3 | 33.55 | |
| Вычисленные величины | | | | |
| $U_L$, В | $U_C$, В | $P$, Вт | $f_0$, Гц | $\varphi$, град |
| 183.43 | 183.78 | 75.6 | 50.15 | 0 |
| Измеренные величины | | | | |
| $U_L$, В | $U_C$, В | $P$, Вт | $f_0$, Гц | $\varphi$, град |
| 183.84 | 183.88 | 75.6 | 50.046 | 1.257 |

Вычисленные и измеренные значения совпали с незначительными погрешностями.

Проведенное компьютерное моделирование в пакете схемотехнического моделирования Multisim наглядно демонстрирует физическое явление — резонанс напряжений в контуре RLC. В ходе эксперимента было подтверждено, что при совпадении частоты внешнего источника с собственной частотой системы, реактивные сопротивления катушки индуктивности и конденсатора взаимно компенсируются.

Главным индикатором резонанса стало резкое возрастание напряжений на реактивных компонентах ($U_L$ и $U_C$) до 183.8 В, что в 4,7 раза превышает входное напряжение (38,89 В). Это подтверждает высокую добротность исследуемого контура.

Резонанс напряжений используется в самых разных сферах [1; 2]:

- Радиотехника и связь: настройка приёмников и передатчиков на нужную частоту, фильтрация сигналов.
- Электроэнергетика: компенсация реактивной мощности, повышение коэффициента мощности.
- Медицина: аппараты для высокочастотной терапии, МРТ‑сканеры, ультразвуковые устройства.
- Промышленность: индукционный нагрев металлов, плавка металлов в индукционных печах.
- Измерительная техника: высокодобротные резонансные контуры в частотомерах и измерителях добротности.
- Аудиотехника: фильтры в акустических системах, эквалайзеры.

- Телекоммуникации: полосовые фильтры в оборудовании сотовой связи.

Понимание резонанса напряжений критически важно для современной электроники: от настройки приемных антенн радиосвязи до проектирования беспроводных зарядных устройств и мощных систем электроснабжения, где резонанс может быть, как полезным продуктом, так и опасным фактором, вызывающим пробой изоляции.

## Библиографический список

1. Журо, М. Н. Использование резонанса токов и напряжений в промышленности / М. Н. Журо; науч. рук. Г. А. Михальцевич // Актуальные проблемы энергетики: материалы 71-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. Секция 6: Электротехника и электроника. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 392-394 (Дата обращения: 27.04.2026);

2. Иванькович, М. С. Практическое исполнение резонанса напряжений = Practical implementation of voltage resonance / М. С. Иванькович, И. В. Столяр // Научная конференция учащихся колледжа: материалы 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18–22 апреля 2022 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минский радиотехнический колледж // электрон. ресурс. URL: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/49036 (Дата обращения: 27.04.2026);

3. Касаткин, А. С. Электротехника: учебник для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. — 10-е изд., стер. — Москва: Академия, 2017. — 544 с. — Текст: непосредственный.

4. Хернитер, М. Е. Экосистема National Instruments: Multisim, Ultiboard и LabVIEW / М. Е. Хернитер. — Москва : ДМК Пресс, 2015. — 584 с. — Текст: непосредственный

© Ильясова А.И., 2026

УДК 621.793.74

М.В. КРЫЛОВ, А.С. ПСЫЩАНИЦА
*1lolxray@gmail.com, anastasia_psyshchanica@mail.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Р.Г. ФАРРАХОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПОКРЫТИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

*Аннотация*. В статье приведен анализ полученных экспериментальным путем данных о покрытии, сформированном на поверхности образца алюминиевого сплава марки Д16-АМ методом плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) в трех электролитах с разным составом.

*Ключевые слова*: алюминиевый сплав, плазменно-электролитическое оксидирование, ПЭО, электролит.

*Введение*: в данное время в авиастроении остро стоит вопрос о использовании низко-плотностных материалов, таких как алюминий, однако, его изначальные прочностные свойства не позволяют применять его повсеместно. Особая структура ПЭО покрытия дает возможность использования алюминиевых сплавов в ответственных узлах машин и механизмов. Широко эта технология не распространена, но она может послужить заменой старым, традиционным методам обработки, так как они не могут обеспечить такие же свойства, как ПЭО. Поэтому, учитывая востребованность, становится задача о получении износо- и коррозионностойкого покрытия, для популяризации данного метода [3].

ПЭО – это электрохимический процесс, при котором на деталь, погруженную в раствор электролита, подают высокое напряжение. В результате на поверхности образца возникают плазменные микроразряды, образующие покрытие. Особый интерес представляет влияние состава электролита на структуру, фазовый состав и эксплуатационные свойства формируемых керамикоподобных покрытий.

Одна из множества сфер, но наиболее нуждающаяся в подобных разработках – авиастроение. Авиационная техника предъявляет жёсткие требования к узлам и деталям, работающим в условиях высоких циклических нагрузок, абразивного износа и коррозионного воздействия. Применение алюминиевых сплавов позволяет существенно снизить массу изделий, однако их природная коррозионная стойкость и поверхностная твёрдость недостаточны для ответственных трущихся пар и агрессивных сред. В качестве примера можно привести алюминиевую гильзу и поршень двигателя внутреннего сгорания, что активно применяются в беспилотных летательных

аппаратах. Кроме требуемых свойств материала, метод обеспечивает доступность производства своей простотой и дешевизной, из-за чего цена конечного продукта значительно снижается. В наше время используют традиционные методы защиты – анодирование, хромирование, лакокрасочные покрытия, однако они не обеспечивают требуемой износостойкости.

*Методика проведения исследования:* в работе использовались плоские образцы из алюминиевого сплава Д16-АМ толщиной 3 мм. Перед оксидированием образцы шлифовали и обезжирили. ПЭО проводилось в пластиковой емкости объемом 5 л, в которую заливался электролит, внутри нее расположен теплообменник из нержавеющей стали, подключенный к катоду. Температура электролита поддерживалась постоянной на уровне 20±1 °С. Амплитуда положительного импульса составляла 550 В, отрицательного – 40 В при частоте 1000 Гц. Опыт проводился в течение 13 минут.

В качестве электролитов использовали три состава:

– ASP1 – 1 г/л KOH, 2 г/л Na2SiO3 (техническое жидкое стекло), 2г/л; фосфат Na4P2O7*10H2O;

– NAL – 15 г/л NaAlO2, 1 г/л KOH;

– ASP2 – 2 г/л KOH, 2 г/л Na2SiO3, 18 г/л Na3PO4*12H2O.

*Результаты исследования*: ПЭО покрытие проявило себя неоднозначно на всех образцах. Состав электролита в значительной мере влияет на структуру покрытия. ASP1 и ASP2 несмотря на схожий состав формируют примерно различные по толщине и сильно разные с точки зрения морфологии поверхности. В то время как первый образец получается с типичной для ПЭО структурой, второй отличается заметно аморфным строением, не похожим на предполагаемый результат. Алюминатный же отличается большей толщиной, но аморфным строением поверхностного слоя. На рис. 1,2,3 представлены топографии покрытий. Основные характеристики ПЭО-покрытий сведены в таблицу 1.

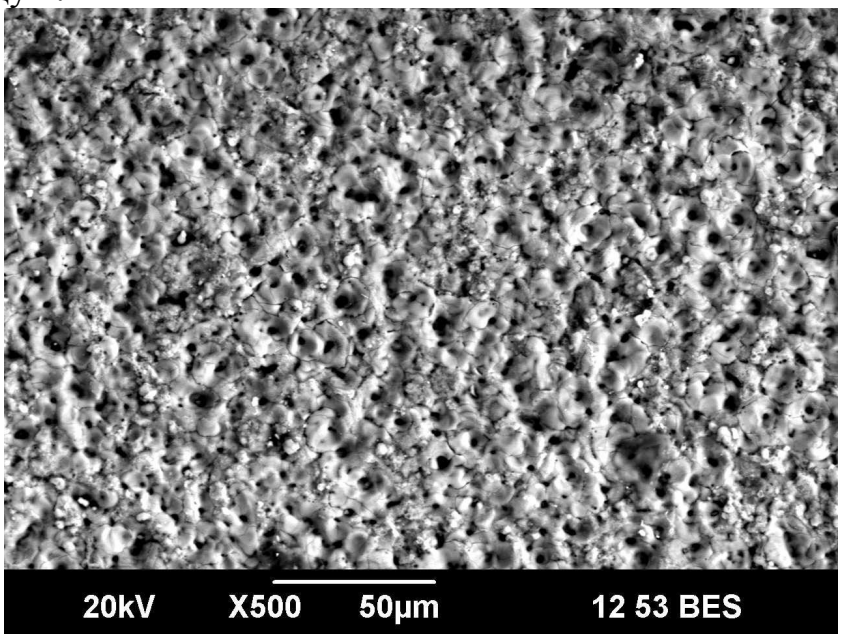



*Рис. 1* – ASP1

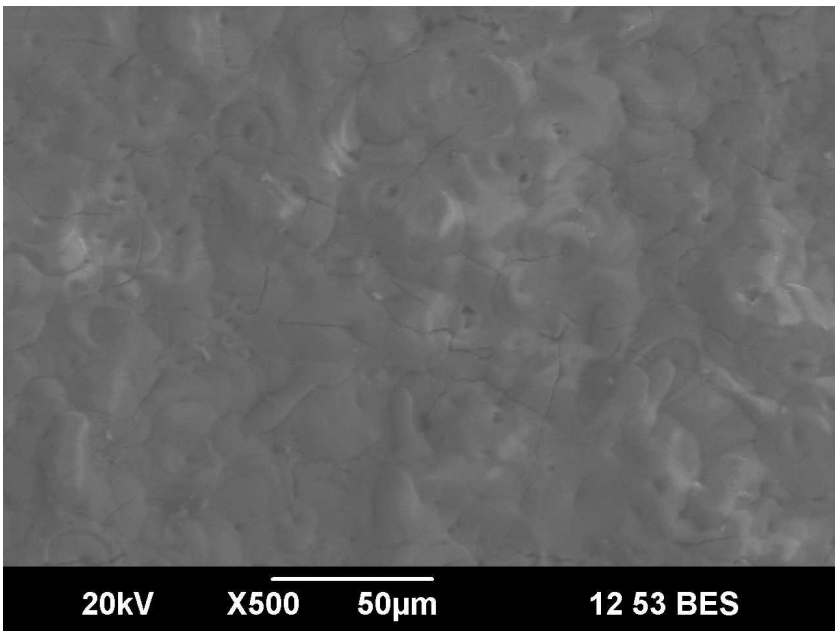



*Рис. 2* – ASP2

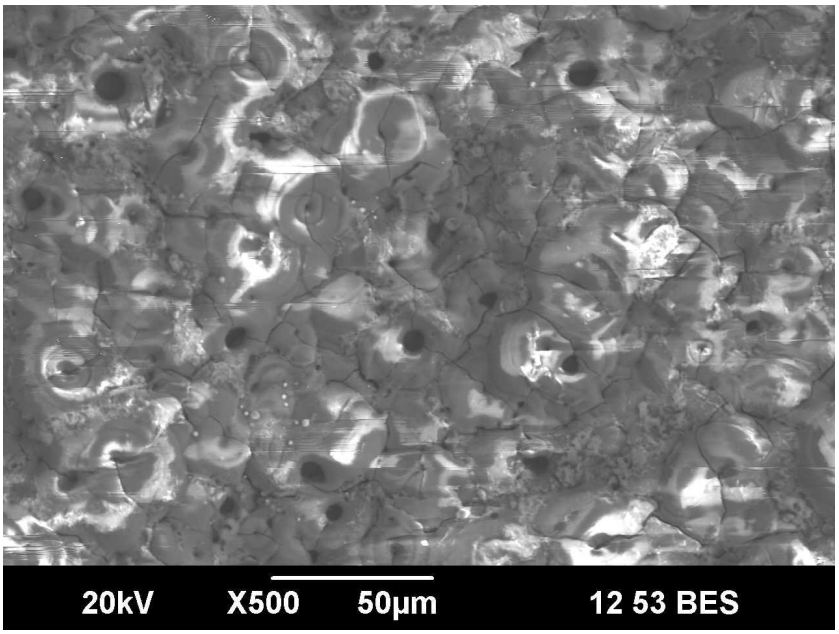



*Рис. 3* – NAL

*Таблица 1*

Основные характеристики ПЭО покрытий

| Код образца | *h*, мкм | Пористость, % |
|---|---|---|
| ASP1 | 11,1+-1,29 | 13,654 |
| ASP2 | 27,2+-1,48 | 1,601 |
| NAL | 28,4+-0,94 | 1,187 |

*Влияние состава электролита на коррозионные свойства покрытия*: на рис. 3 представлены результаты коррозионных испытаний в виде

поляризационных кривых. Рассчитанные коррозионные параметры образцов представлены в таблице 2.

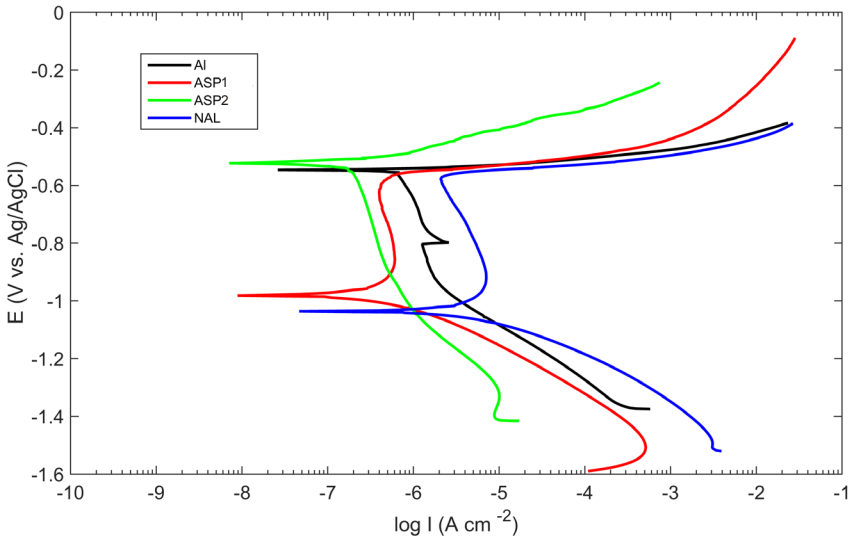



*Рис. 4* – поляризационные кривые образца без покрытия (Al), и образцов после ПЭО обработки

*Таблица 2*

Коррозионные параметры образцов

| Образец | $E_{corr}$ (В) | $i_{corr}$ (А/см$^2$) | $R_p$ (Ом·см$^2$) |
|---|---|---|---|
| AL | -0.546 | $6.61 \cdot 10^{-7}$ | $5.23 \cdot 10^{3}$ |
| ASP2 | -0.982 | $2.38 \cdot 10^{-7}$ | $7.61 \cdot 10^{4}$ |
| ASP | -0.523 | $1.78 \cdot 10^{-7}$ | $9.62 \cdot 10^{4}$ |
| NAL | -1.036 | $1.37 \cdot 10^{-6}$ | $6.79 \cdot 10^{3}$ |

Из анализа поляризационных кривых видно, что тафелевские участки на катодных ветвях наблюдаются у всех образцов. У образцов, обработанных в электролитах ASP2 и NAL на анодных ветвях поляризационных кривых наблюдаются участки пассивации [1].

Обработка в электролитах ASP2 и NAL приводит к активации поверхности образцов, о чем свидетельствует малая величина потенциала свободной коррозии $E_{corr}$. Смещение потенциала $E_{corr}$ в сторону больших значений указывает на пассивацию поверхности, наибольшее значение наблюдается у образца, обработанного в электролите ASP1.

Обработка в электролите NAL приводит увеличению тока коррозии $i_{corr}$, что связано формированием развитой поверхности с большим количеством глубоких пор, что приводит к увеличению площади контактной поверхности. Обработка в данном режиме требует дальнейшей оптимизации. Наименьшим током и как следствие наилучшими коррозионными характеристиками обладает

образец ASP1, что связано с формированием плотного толстого покрытия с малым количеством дефектов и меньшим количеством пор в сравнении с образцами, обработанными в других электролитах. Значения поляризационных сопротивлений $R_p$ коррелируют со значениями токов коррозии [2].

*Вывод*: анализ коррозионных свойств показал, что наилучшие защитные характеристики демонстрирует покрытие, полученное в электролите ASP1, что подтверждается минимальным значением тока коррозии и наибольшим поляризационным сопротивлением. Это связано с формированием более плотного и менее дефектного слоя. В то же время использование электролита NAL приводит к увеличению пористости активного слоя и ухудшению коррозионной стойкости, что требует дальнейшего подбора компонентов электролита.

**Библиографический список**

1. Scully, J. R. Polarization Resistance Method for Determination of Instantaneous Corrosion Rates / J. R. Scully // Corrosion. – 2000. – Vol. 56, No. 2. – P. 199–218.

2. Парфенов Е.В., Фаррахов Р.Г., Мукаева В.Р., Горбатков М. В., Мелемчук И. А., Стоцкий А. Г., Чернейкина Я. В. Автоматизированная технологическая установка для исследования электролитно-плазменных процессов // Вестник УГАТУ, 2016. Т.20. №4 (74). С. 23-31.

3. Ешманова Г.Б., Смагулов Д.У., Блаверт К. Технология плазменного электролитического оксидирования для получения защитных покрытий алюминиевых сплавов // Комплексное Использование Минерального Сырья. №2 (317), 2021

© Крылов М.В., Псыщаница А.С., 2026

УДК 71.053

А.Л. ЛУКМАНОВА
*alinalalala2000@mail.ru*
Науч. руководитель – ст. преподаватель Е.В. ЛАРИОНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В БПЛА: ВЛИЯНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ НА НАВИГАЦИЮ И ТЕЛЕМЕТРИЮ

*Аннотация*. Исследовано влияние трассировки печатных плат полётного контроллера БПЛА на уровень электромагнитных помех от силовых ШИМ-регуляторов. Показано, что оптимизация возвратных токовых путей и

импеданса распределительной сети питания снижает излучаемые помехи в диапазоне 5,8 ГГц на 18 дБ, повышает $C/N_0$ GPS на 4,6 дБ-Гц и сокращает потери пакетов телеметрии с 4,1% до 0,3%. Предложенные решения применимы при проектировании помехоустойчивой бортовой электроники БПЛА малого класса.

*Ключевые слова:* ЭМС; БПЛА; трассировка PCB; ШИМ; GNSS; телеметрия; помехоподавление; возвратные токи.

**Введение**

Актуальность темы обусловлена миниатюризацией бортовой электроники беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и увеличением плотности компоновки узлов. В ограниченном пространстве силовые тракты регуляторов хода (electronic speed controller, ESC), навигационные модули и высокочастотные радиоканалы располагаются вплотную, что создаёт риски нарушений электромагнитной совместимости (ЭМС). Отказы позиционирования и потеря телеметрии часто вызваны физическими процессами генерации электромагнитных помех (ЭМП) внутри сети. Цель работы – систематизировать механизмы возникновения ЭМП в силовых цепях БПЛА, оценить их влияние на навигацию и телеметрию, доказать роль топологии печатных плат (printed circuit board, PCB) полётного контроллера. Научная новизна заключается в выявлении корреляции между геометрией возвратных токов на PCB и метриками стабильности связи (отношение мощности несущей к плотности шума, *C/N0*) при максимальной частоте коммутации силовых ключей.

**Теоретические основы и механизмы генерации помех**

Силовая архитектура мультикоптера включает аккумулятор, регуляторы хода и бесколлекторные двигатели. Основным источником ЭМП выступают полевые транзисторы структуры металл-окисел-полупроводник (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) в ESC, коммутирующие токи до 30–60 А на частотах широтно-импульсной модуляции (ШИМ) 8–48 кГц. Крутые фронты коммутации (dV/dt>10 В/нс, dI/dt>50 А/мкс) формируют спектр гармоник до сотен мегагерц. Гармоники ШИМ совместно с паразитными резонансами создают узкополосные пики в диапазонах 2,4 ГГц и 5,8 ГГц. Помехи распространяются кондуктивным, излучаемым и ёмкостно-индуктивным путями. Приёмники глобальной навигационной спутниковой системы (global navigation satellite system, GNSS) работают в полосе 1,227–1,602 ГГц, телеметрия и видеопередача – в диапазонах 433 МГц, 868 МГц, 2,4 ГГц и 5,8 ГГц. Попадание гармоник в рабочие полосы вызывает десинхронизацию, снижение C/N0 и рост коэффициента битовых ошибок (bit error rate, BER). Внутренние помехи часто превышают внешние. Традиционное экранирование без коррекции топологии земляных полигонов даёт подавление 5–8 дБ, тогда как оптимизация возвратных путей снижает ЭМП на 15–20 дБ.

**Влияние трассировки печатных плат полётного контроллера на уровень электромагнитных помех**

Полётный контроллер (ПК) объединяет силовые, аналоговые (инерциальный измерительный модуль, IMU) и цифровые тракты. Трассировка PCB напрямую определяет помехоустойчивость. На частотах выше 1 МГц возвратные токи идут по пути наименьшего импеданса. Разрывы земляного полигона и некорректное расположение переходных отверстий формируют токовые петли большой площади, работающие как магнитные антенны. Импеданс распределительной сети питания (power distribution network, PDN) критичен для стабильности микроконтроллера и радиочастотных чипов. Некорректное размещение многослойных керамических конденсаторов (multi-layer ceramic capacitor, MLCC) вызывает резонансы в полосе 10–500 МГц. Оптимизация их расположения и использование сплошных слоёв питания и земли снижают выбросы напряжения на 8–12 дБ. Сегментация земель требует осторожности: рекомендуется единый полигон или соединение в одной точке. Трассировка дифференциальных пар (универсальный асинхронный приёмопередатчик, UART; последовательный периферийный интерфейс, SPI) требует контроля импеданса (90/100 Ом) и исключения пересечений с силовыми шинами.

**Методика исследования и экспериментальные данные**

Проведён сравнительный анализ штатной и оптимизированной конфигураций PCB в экранированной камере с анализатором спектра, ближнепольными зондами и программой QGroundControl. Метрики: уровень помех в полосе 5,6–6,0 ГГц (ближнее поле, 5 см от платы), C/N0 при 100% тяги, BER и потери пакетов телеметрии. Результаты: пик излучаемых помех на 5,8 ГГц снизился с −58 дБм до −76 дБм (Δ=18 дБ) за счёт устранения разрывов земли. Средний C/N0 вырос с 31,2 дБ-Гц до 35,8 дБ-Гц. Потери пакетов сократились с 4,1% до 0,3%, BER упал с $2{,}8\times10^{-3}$ до $1{,}1\times10^{-5}$. Применение фильтров с катушкой индуктивности и конденсатором (LC-фильтров) на шинах ESC совместно с оптимизированной трассировкой подавило кондуктивные помехи в полосе 100 кГц–50 МГц на 22 дБ. Эффективность фильтрации сохраняется только при низком импедансе возвратного пути.

**Заключение**

ЭМС в БПЛА малого класса является критическим фактором надёжности. Силовая часть на базе ШИМ генерирует широкополосные помехи, дестабилизирующие GNSS и телеметрию. Топология PCB полётного контроллера определяет уровень ЭМП: оптимизация возвратных путей, импеданса PDN и сегментации земель снижает помехи на 15–20 дБ без усложнения конструкции. Комплексное применение правил трассировки и локальной фильтрации повышает устойчивость бортовой электроники к внутренним наводкам. Результаты согласуются с современными исследованиями и применимы при проектировании платформ малого класса.

Перспективным направлением является автоматизация проверки правил ЭМС на этапах проектирования и внедрение адаптивной компенсации помех.

## Библиографический список


1. Ott, H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – John Wiley & Sons, 2009. – 1024 p.
2. Белоусов А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения БПЛА мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 134–196.
3. Белоусов А. О. Повышение помехозащищённости БПЛА в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 2. – С. 88–104.
4. Отчёт лаборатории электромагнитной совместимости УУНИТ: «Анализ спектрального состава помех от ШИМ-регуляторов БПЛА и их влияние на GNSS-приёмники». – Уфа, 2024.
5. Paul, C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. – 2nd ed. – Wiley, 2006. – 1008 p.
6. Johnson, H., Graham, M. High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic. – Prentice Hall, 1993. – 560 p.
7. Методические рекомендации по проектированию PCB полётных контроллеров с учётом требований ЭМС / Кафедра телекоммуникационных систем, УУНИТ. – Уфа, 2025.
8. ГОСТ Р 55151-2012. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013.
9. DO-160G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. – RTCA, 2014.
10. Аюпов Р. З. Разработка инновационных антенн для БПЛА: выпускная квалификационная работа бакалавра. – Уфа: УУНИТ, 2024.
11. Дудин В. А. Малоразмерный ГТД для БПЛА самолётного типа: выпускная квалификационная работа бакалавра / науч. рук. А. Д. Мингажев. – Уфа: УУНИТ, 2024.
12. Балагужин Н. Т. Анализ и моделирование системы управления разведывательного БПЛА: выпускная квалификационная работа бакалавра. – Уфа: УУНИТ, 2024.


©Лукманова А.Л., 2026

УДК 681.536.55

А.А. МИТРОФАНОВ
*mitrofanov210b@gmail.com*
Науч. руковод. – ст. преподаватель Е.В. ЛАРИОНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ЦИФРОВОЙ ТЕРМОСТАТ

*Аннотация*. В статье описана система устройства цифрового термостата для удаленного управления котлом отопления.

*Ключевые слова*: GSM термостат, котел отопления, Arduino Uno, датчик температуры DS18B20, Shield SIM900, энкодер HW-040, модуль реле, устройство цифрового термостата.

В связи с выходом из строя ранее работающей GSM розетки, с помощью которой можно было удаленно запросить текущую температуру, используя СМС команды, отправленные на сим-карту, установленную в ней. Появилась потребность в холодное время года, удаленно контролировать и управлять газовым котлом отопления, поддерживающего установку внешнего релейного термостата.

Были изучены различные готовые предложения на рынке, многие из которых оказались бесполезными, в плане пресечения проблем с котлом, что приводит к заморозке воды в доме и затратам на ремонт, а готовые термостаты получились весьма неудобными при излишне завышенной цене. Создание своего GSM термостата позволяет, за разумные деньги (до 3 тысяч рублей) сделать изделие, которое будет заточено под конкретные пожелания создателя и по возможностям будет превосходить готовые решения за 9 тысяч рублей.

Для создания термостата была выбрана платформа Arduino Uno, которая отлично взаимодействует с цифровыми и аналоговыми компонентами (рис. 1).

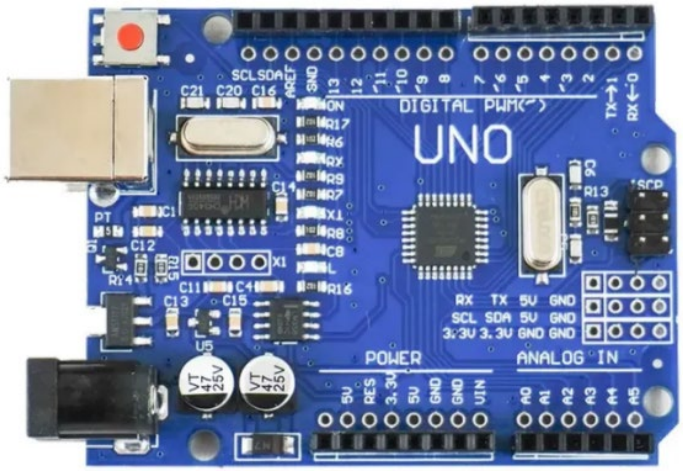



*Рис. 1.* Контроллер Arduino Uno

Для получения показаний текущей температуры был использован цифровой датчик температуры DS18B20 (рис. 2).



*Рис. 2.* Цифровой датчик температуры DS18B20

Датчик DS18B20 — это не просто термометр, а миниатюрный компьютер в корпусе транзистора (или герметичной гильзе). Внутри чипа находятся несколько ключевых узлов (рис. 3):

1. Температурный сенсор: Аналоговый элемент, меняющий свои свойства от нагрева;
2. АЦП (Аналого-цифровой преобразователь): Он превращает сигнал от сенсора в 12-битное число;
3. 64-битное ROM: в него «зашит» уникальный серийный номер. Именно он позволяет контроллеру найти конкретный датчик среди десятка других на одном проводе.
4. Память (SRAM и EEPROM): SRAM: Хранит текущее значение температуры после замера. EEPROM: Энергонезависимая память, где можно сохранить настройки (например, точность измерения или пороги срабатывания тревоги), которые не сотрутся при выключении питания.

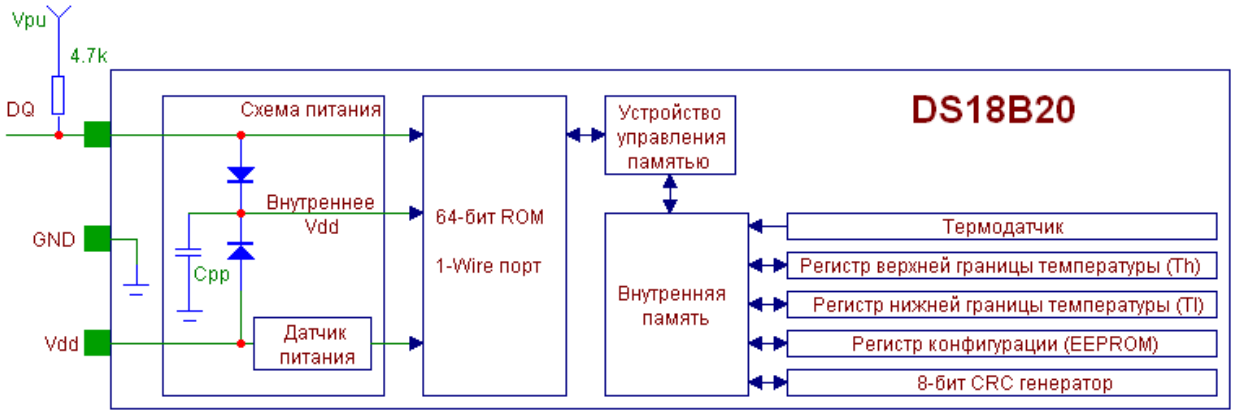



*Рис. 3.* Блок-схема датчика DS18B20

Для удаленного управления термостатом был использован GSM GPRS Shield SIM900 (рис. 4).

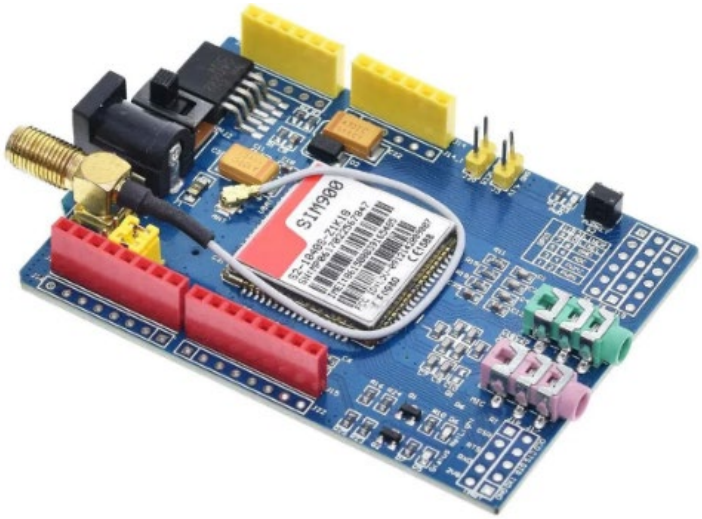



*Рис. 4.* GSM GPRS Shield SIM900

Для вывода информации был использован дисплей LCD1602 с модулем I2C. Управление и изменением установленных значений, необходимых для работы, осуществлено с помощью модуля поворотного энкодера HW-040. Размыкание цепи термостата котла отопления выполняется через реле.

Установка вешается вблизи с котлом отопления, питание выполняется с помощью зарядного блока на 12 В (рис. 5).

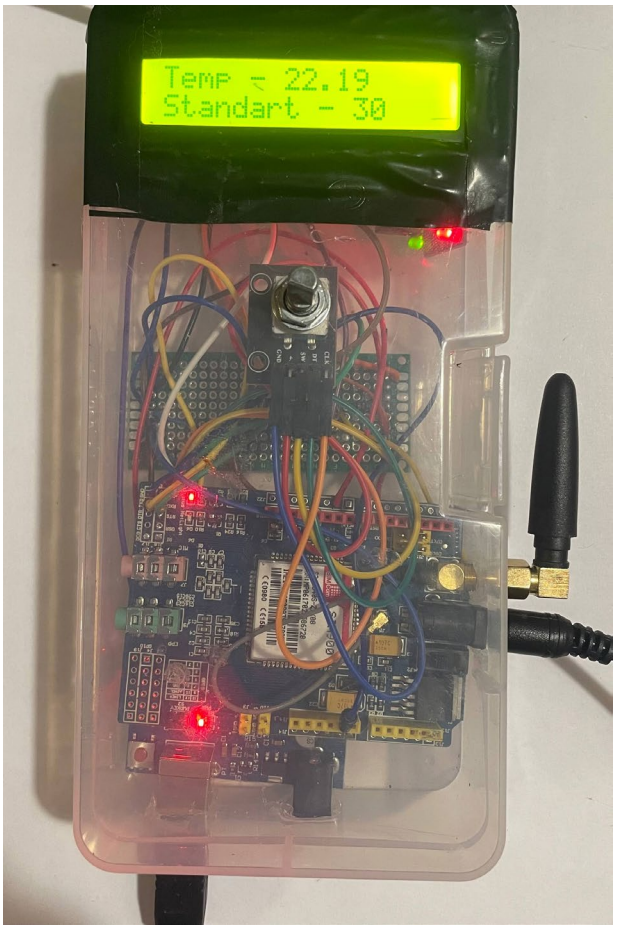



*Рис. 5.* Визуальный вид цифрового термостата

Схема подключения всех компонентов цепи (рис. 6).

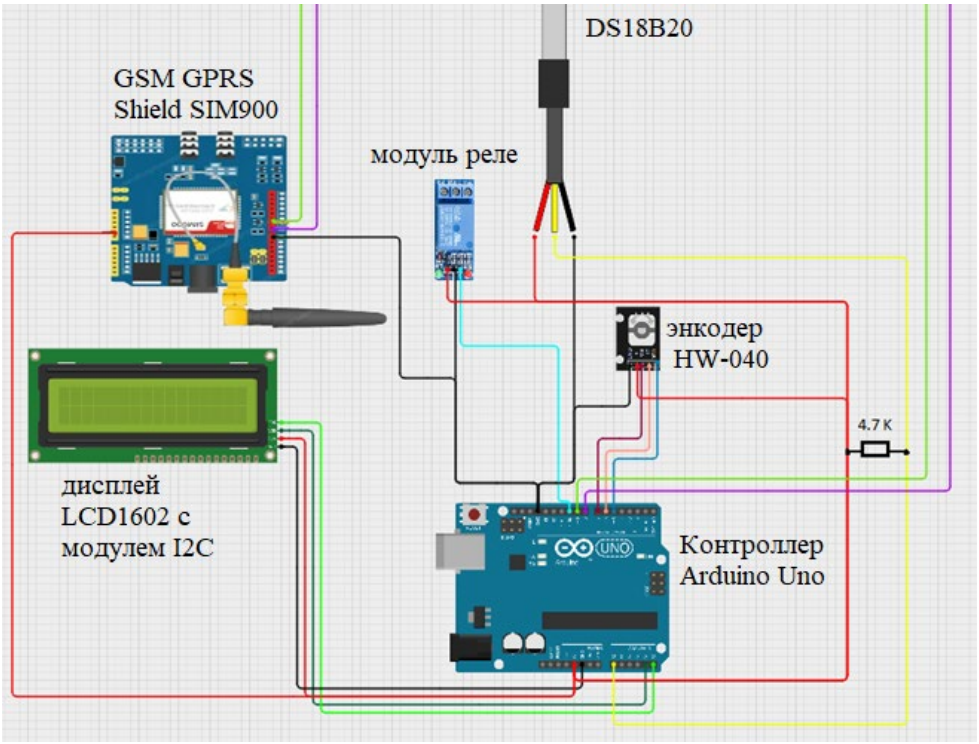



*Рис. 6.* Схема подключения компонентов цифрового термостата

## Библиографический список

1. Документация Arduino Uno URL: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3 (дата обращения: 26.02.2026).

2. Аналоговая и цифровая электроника: Электротехника и электроника: Аналоговая и цифровая электроника : учебное пособие / [О. В. Мельничук и др.] ; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : РИК УГАТУ, 2019. – 96 с. (дата обращения: 09.02.2026).

3. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Datasheet URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf (дата обращения: 12.03.2026).

4. GSM/GPRS Shield SIM900. Руководство и примеры подключения к Arduino URL: https://lastminuteengineers.com/sim900-gsm-shield-arduino-tutorial/ (дата обращения: 22.03.2026).

5. Подключение LCD1602 с модулем I2C к Arduino URL: https://docs.sunfounder.com/projects/sensorkit-v2-arduino/en/latest/lesson_1.html (дата обращения: 22.03.2026).

6. Роторный энкодер KY-040 (HW-040). Примеры использования с Arduino URL: https://www.phippselectronics.com/using-the-rotary-encoder-module-ky-040-with-arduino/ (дата обращения: 24.03.2026).

© Митрофанов А.А., 2026

УДК 530.145

А.А. МУХАМАДИЕВА
hinakamu09@gmail.com
Науч. руководов. — канд. техн. наук, доцент О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

# ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: СХЕМОТЕХНИКА КВАНТОВЫХ ПРОЦЕССОРОВ

*Аннотация.* Рассмотрены принципы работы квантовых процессоров, физическая реализация кубитов и архитектура квантовых систем. Проанализированы основные технологии (сверхпроводящие и ионные кубиты), их преимущества и ограничения. Рассмотрены современные возможности квантовых вычислений, их практическое применение и их ограничения.

*Ключевые слова:* квантовые вычисления; кубит; суперпозиция; квантовый процессор; ионные ловушки; сверхпроводники; квантовое превосходство.

Классические компьютеры строятся на основе двоичной логики, используя биты, которым может быть присвоено значение либо 0, либо 1. Все вычисления сводятся к миллиардам переключений между этими двумя значениями, выполняемые транзисторами [12]. Квантовые процессоры предлагают совершенно иной подход к обработке информации. Вместо битов они используют кубиты. Кубит может быть не только 0 или 1, но и находиться в их суперпозиции — то есть одновременно быть и нулём, и единицей с определенной вероятностью [1]. Это позволяет квантовому процессору обрабатывать огромное количество состояний параллельно. Однако платой за такую мощь становится невероятная сложность схемотехники: кубиты живут доли миллисекунды, разрушаются от малейшего внешнего воздействия и, как правило, требуют сверхнизких температур.

В классической физике объект всегда находится в каком-то определённом состоянии. В квантовой механике объект может находиться во всех возможных состояниях одновременно. Это и есть суперпозиция [1]. До измерения кубит имеет значение одновременно 0 и 1, после измерения — либо 0, либо 1, причём результат случаен и подчиняется квантово-механическим вероятностям. Математически состояние одного кубита описывается двумя комплексными числами (амплитудами вероятностей), сумма квадратов модулей которых равна 1. Это позволяет кодировать бесконечно много состояний, но при измерении получается только один бит информации. Для математического описания обычно используют векторную запись в представлении Дирака:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1,$$

где $\alpha$ и $\beta$ — амплитуды вероятности, удовлетворяющие условию нормировки [1]. Сфера Блоха — геометрический способ представления чистых состояний кубита в виде точек на единичной сфере. Она позволяет наглядно представить суперпозицию состояний.

На сегодняшний день существует четыре основные технологии, в той или иной мере реализующие кубитные архитектуры: сверхпроводники, ионы в ловушке, нейтральные атомы и фотонные кубиты [3, 9]. Далее подробно рассмотрены две наиболее распространенные: сверхпроводящие и ионные.

Физическая основа сверхпроводящего кубита — джозефсоновский контакт, представляющий собой многослойную структуру: два сверхпроводящих слоя (например, алюминий) разделённые тончайшим слоем диэлектрика (обычно оксид алюминия) толщиной порядка нескольких нанометров. Такая конфигурация создаёт туннельный барьер для куперовских пар [3]. Джозефсоновские контакты проявляют эффекты из области квантовой механики в обычном, не атомном масштабе (например, квантование энергии). Это обстоятельство позволяет использовать такие контакты в качестве кубитов. Преимущества данной технологии в том, что она технологически близка к производству классических полупроводниковых чипов, что позволяет с помощью литографических методов размещать десятки и сотни кубитов на одном кристалле. Время выполнения квантовых операций очень мало — от 5 до 20 наносекунд, благодаря чему до наступления декогеренции удаётся выполнить значительное число операций. Управление кубитами осуществляется электрическими сигналами (СВЧ-импульсами), что является относительно простым и хорошо отработанным подходом.

Главный недостаток сверхпроводящих кубитов — крайне малое время декогеренции. Оно обусловлено тем, что кубиты размещаются на кристаллах в непосредственной близости от подложки, межсоединений и других элементов схемы, что неизбежно приводит к их взаимодействию с окружающей средой [10, 11]. Высокая чувствительность к шумам любого происхождения требует дополнительных усилий и средств для увеличения времени декогеренции. Например, для минимизации теплового шума требуются сверхнизкие температуры (10–20 милликельвин), достигаемые в криостатах растворения [3]. Это необходимо, поскольку даже незначительная тепловая энергия способна вызвать декогеренцию и разрушить состояние суперпозиции. Еще одна проблема — необходимость индивидуального СВЧ-генератора для управления каждым кубитом, что при масштабировании системы приводит к резкому росту числа межсоединений и тепловой нагрузки [11]. Хотя параметры постепенно улучшаются, время жизни кубитов остаётся ограниченным. Несмотря на недостатки, сверхпроводящие кубиты лидируют по количеству промышленных реализаций. Данную технологию используют Google (процессор Sycamore), IBM (серия IBM Q), Intel (процессор Tunnel Falls).

Ионные ловушки являются второй по развитости технологией. В процессорах данного типа кубитами служат одиночные заряженные атомы (ионы), которые удерживаются в вакууме с помощью электромагнитных полей

[4]. Лазеры охлаждают ионы почти до абсолютного нуля и манипулируют ими для выполнения разных операций. На рисунке 1 видно, как изменяется расстояние между ионами при увеличении их количества. Чем больше ионов в ловушке, тем сильнее они сближаются, и вот всего лишь 12-ионная цепочка становится зигзагообразной линией. Сейчас с помощью трехмерных ловушек можно выстраивать цепочки из 22 ионов, но самой стабильной и эффективно управляемой системой на данный момент является система из 5 ионов.

Ионные кубиты отличаются очень долгим временем когерентности: в полевых условиях они сохраняют состояние до нескольких десятков секунд, в лабораторных — до 10 часов [5]. Благодаря этому создается достаточный временной ресурс, с помощью которого достигается высочайшая точность операций: ошибки одно-кубитных гейтов составляют менее 0,01%, двух-кубитных — менее 0,1% [4]. Кроме того, все ионы одной природы идентичны, что упрощает калибровку системы. Основной недостаток ионных процессоров — медленное быстродействие. Типичное время одного гейта составляет несколько микросекунд, что в 100–1000 раз медленнее, чем у сверхпроводящих кубитов. Масштабирование также крайне затруднено: с ростом числа ионов линейная цепочка становится неустойчивой (начинает изгибаться в зигзаг), а более сложные конфигурации трудно реализовать [4]. Дополнительную проблему создаёт необходимость в сложном лазерном оборудовании и сверхвысоком вакууме.

Типовая архитектура квантового процессора состоит из: кубитного массива, электроники управления, межсоединений, системы считывания, коррекции ошибок, криогенных систем и защиты от внешних воздействий.

Квантовое превосходство было продемонстрировано Google в 2019 году на процессоре Sycamore (53 кубита). За 200 секунд была выполнена задача сэмплирования выходных данных случайных квантовых схем (Random Circuit Sampling), которая по оценкам авторов заняла бы на самом мощном классическом суперкомпьютере около 10 000 лет. Позже этот результат был оспорен (нашли эффективный классический алгоритм, основанный на ферме видеокарт), но важен сам факт демонстрации.

Развитие квантовых технологий открывает широкие перспективы для решения многих задач:

— На небольших квантовых процессорах уже смоделированы простейшие молекулы (например, $H_2$, LiH) [8]. Подобные вычисления были предсказаны еще Ричардом Фейнманом как основная сфера применения квантовых устройств [7];

— Есть задачи, где нужно выбрать лучший вариант из миллиардов возможных. Для этого используют алгоритм QAOA, который на малых задачах находит решения быстрее или точнее, чем классические алгоритмы [12];

— Квантовая криптография — это метод защиты передачи данных, основанный на законах квантовой механики, а не на математической сложности, как в традиционной криптографии. Она гарантирует безусловную безопасность: попытка перехвата ключа меняет состояние кубитов, что сразу

обнаруживается отправителем и получателем, делая несанкционированный доступ невозможным [13].

Квантовые компьютеры — узкоспециализированные устройства, которые в подавляющем большинстве повседневных задач проигрывают классическому компьютеру [6]:

— Сфера применения квантовых компьютеров ограничена специфическими задачами; в большинстве вычислений они не дают выигрыша;

— У квантовых систем нет памяти в привычном понимании из-за теоремы о запрете клонирования [1];

— Состояния кубитов нестабильны: любое внешнее воздействие разрушает вычисления [10].

На представленной схеме (рис. 1) выполняется операция сложения 1+1. Чтобы получить ответ «2» использовалось 3 кубита и 4 гейта.

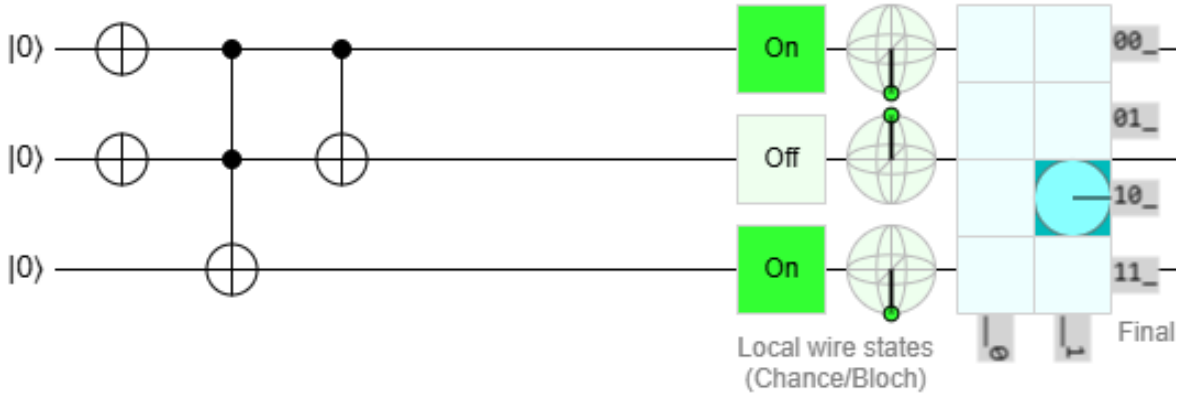



*Рис. 1*. Операция сложения 1+1 на квантовом компьютере

На классическом компьютере подобная схема будет состоять из двух базовых логических элементов: XOR и AND (рис. 2).

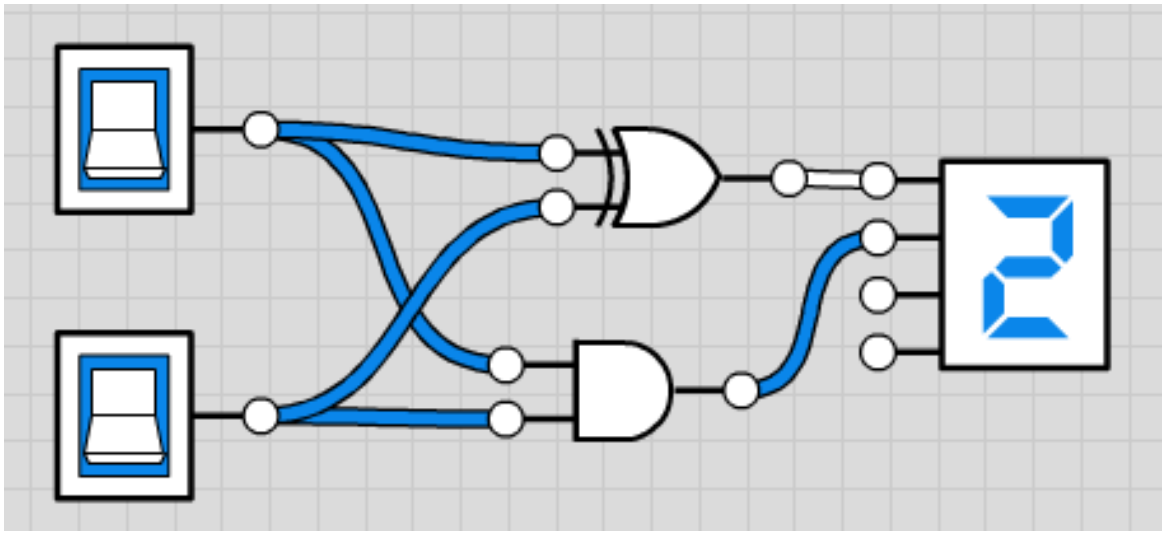


*Рис. 2*. Схема логического полусумматора для операции 1+1 на классическом компьютере

Те операции, которые классический компьютер выполняет миллиарды раз в секунду за копейки, на квантовом компьютере стоят огромных ресурсов и усилий по поддержанию кубитов.

Квантовый процессор — это не просто новый тип компьютера, а совершенно другой способ реализации вычислений, позволяющий перебирать варианты не по очереди, а сразу все. Но за эту мощь приходится платить. Кубиты очень нежные: они боятся тепла, шумов и даже случайных фотонов. Их нужно охлаждать почти до абсолютного нуля, прятать в многослойные экраны и защищать от вибраций. Современные квантовые процессоры пока не могут работать полностью автономно, поэтому они используются как мощные «сопроцессоры» для обычных суперкомпьютеров [12]. В такой связке классический компьютер управляет процессом и готовит данные, а квантовое ядро решает конкретную сложную математическую задачу, с которой не справляются обычные алгоритмы.

## Библиографический список


1. Нильсен, М. Квантовые вычисления и квантовая информация: пер. с англ. / М. Нильсен, И. Чанг; под ред. К. А. Валиева. — Москва: Мир, 2006. — 824 с.

2. Arute, F. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor / F. Arute, K. Arya, R. Babbush [et al.] // Nature. — 2019. — Vol. 574, № 7779. — P. 505–510. — DOI: 10.1038/s41586-019-1666-5.

3. Физическая реализация кубитов в квантовых вычислениях. // LenLasers : [сайт]. — 2024. — URL: https://lenlasers.ru/novosti-i-stati/fizicheskaya-realizatsiya-kubitov-v-kvantovykh-vychisleniyakh/ (дата обращения: 18.04.2024) — Текст: электронный

4. Заливако, И. В. Квантовые вычисления на ионах в ловушках: принципы, достижения и перспективы / И. В. Заливако, Н. В. Семенин [и др.] // Успехи физических наук. — 2021. — Т. 191, № 2. — С. 113–142.

5. Pi, J. Beyond-Ten-Hour Coherence in a Decoherence-Free Trapped-Ion Clock Qubit / J. Pi [et al.]. — 2026. — URL: https://arxiv.org/abs/2603.19631 (дата обращения: 02.05.2026). — Текст: электронный.

6. Dyakonov, M. The Case Against Quantum Computing / M. Dyakonov // IEEE Spectrum : [сайт]. — 2018. — URL: https://spectrum.ieee.org/the-case-against-quantum-computing (дата обращения: 08.04.2026). — Текст: электронный.

7. Feynman, R. P. Simulating physics with computers / R. P. Feynman // International Journal of Theoretical Physics. — 1982. — Vol. 21. — P. 467–488. — DOI: 10.1007/BF02650179.

8. Georgescu, I. M. Quantum simulation / I. M. Georgescu, S. Ashhab, F. Nori // Reviews of Modern Physics. — 2014. — Vol. 86, № 1. — P. 153–185. — DOI: 10.1103/RevModPhys.86.153.

9. O'Brien, J. L. Photonic Quantum Technologies / J. L. O'Brien // Science. — 2007. — Vol. 318, № 5856. — P. 1567–1570. — DOI: 10.1126/science.1142892.

10. Preskill, J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond / J. Preskill // Quantum. — 2018. — Vol. 2. — P. 79. — DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79

11. Ristè, D. Detecting bit-flip errors in a logical subset of a multi-qubit surface code chip / D. Ristè [et al.] // npj Quantum Information. — 2015. — Vol. 1. — Art. № 15011. — DOI: 10.1038/npjqi.2015.11.

12. What is Quantum Computing? // IBM : [сайт]. — 2024. — URL: https://www.ibm.com/think/topics/quantum-computing (дата обращения: 01.04.2026). — Текст: электронный.

13. Квантовые криптографические системы // Komrunet: [сайт]. — 2024. — URL: https://komrunet.ru/catalog/kvantovye-kriptograficheskie-sistemy/ (дата обращения: 02.05.2026). — Текст: электронный.

© Мухамадиева А.А., 2026

УДК 621.396.6

Т.Н. НУРГАЛЕЕВ, Т.А. МУТАЛЛАПОВ
tagirnurgaleev9@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент О.В. Мельничук

***Уфимский университет науки и технологий***

## УМНЫЙ УЛЕЙ

*Аннотация.* В данной статье рассматривается разработка системы «умного улья», предназначенной для автоматического мониторинга состояния пчелиной семьи. Описываются архитектура системы, используемые датчики, микроконтроллеры, способы передачи данных и программное обеспечение. Проводится анализ преимуществ и недостатков внедрения подобных технологий в пчеловодстве, а также оценивается их влияние на эффективность работы пасеки.

*Ключевые слова:* умный улей, интернет вещей, IoT, пчеловодство, датчики, ESP32, мониторинг, автоматизация, беспроводная передача данных

### Введение

Актуальность исследования обозначена глобальным снижением популяции пчёл, играющих важную роль в опылении растений и поддержании сельского хозяйства. Традиционные методы контроля состояния ульев требуют постоянного участия человека и являются тяжелым трудом. В связи с этим возникает необходимость автоматизации процессов мониторинга.

Цель исследования – наглядно показать электронную систему, обеспечивающую мониторинг состояния пчелиного улья в режиме реального времени.

Задачи исследования:

1.Изучить принципы работы датчиков для контроля параметров улья;

2.Выбрать оптимальный микроконтроллер и систему питания;

3.Изучить беспроводную передачу данных;

4.Обеспечить комфортную визуализацию информации.

**1.Архитектура системы**

Проект реализован на базе *IoT*-принципов, предполагающих глубокую интеграцию аппаратных и программных узлов в согласованную экосистему. Нижний ярус системы занимают сенсорные устройства, непрерывно фиксирующие микроклиматические и физические показатели внутренней среды. Считанная информация направляется на вычислительный контроллер, где проходит начальную фильтрацию и структурирование. После обработки телеметрия передаётся через радиоканал на удалённый сервер для долгосрочного хранения и анализа. Завершающее звено цепи представляет собой клиентское ПО (веб-панель или смартфонное приложение), обеспечивающее графическое отображение метрик и систему автоматических оповещений. Конструкция отличается блочным принципом сборки: обновление или замена отдельных узлов не требует перепроектирования комплекса. Решение легко адаптируется под растущие задачи: допускается наращивание количества измерительных точек или объединение разрозненных ульев в общую телеметрическую сеть для диспетчерского контроля всей пасеки.

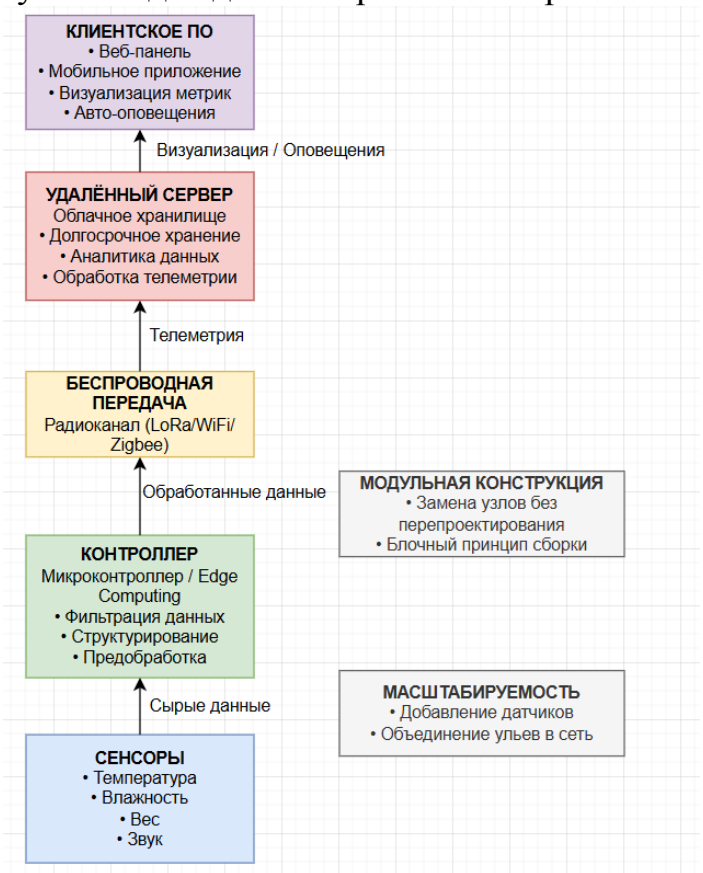



*Рис. 1.* Блок схема

**2.Датчики температуры и влажности.**

Для контроля состояния улья важно отслеживать температуру и влажность, так как от них зависит здоровье пчёл и развитие расплода. Отклонения могут привести к гибели личинок, плесени или снижению активности пчёл.

В проекте используются несколько типов датчиков. DHT22 – универсальный, измеряет температуру и влажность ($5-15 – на *AliExpress* (бюджетные варианты)) [4]. *DS*18*B*20 – цифровой, с высокой точностью, может подключаться в нескольких точках улья по одной линии ($0,30-2,50 – чип/простой датчик) [5]. *SHT*31 – более продвинутый, с высокой точностью и стабильностью, работает по интерфейсу *I2C* ($2,80–4,50 – *AliExpress*) [7]. Использование нескольких датчиков повышает надёжность системы и даёт более точную картину состояния улья.

**3.Датчики веса и звука.**

Вес и звуковой фон улья – ключевые индикаторы состояния семьи. Масса фиксируется тензодатчиком с АЦП *HX*711 (24 бит) (100-200 руб) [6], работающим по принципу изменения сопротивления при нагрузке. Предел измерений – 200 кг, что позволяет дистанционно отслеживать медосбор. Акустический модуль регистрирует звуковые колебания: отклонения в частоте или громкости сигнализируют о стрессе, болезни или роении. Первичная обработка сигнала (пороговый контроль или спектральный анализ) выполняется микроконтроллером. Совместное использование датчиков даёт комплексные данные о продуктивности и поведении пчёл.

**4.Микроконтроллер: сердце системы**

Центральный элемент системы – микроконтроллер. Он управляет датчиками, обрабатывает данные и отвечает за их передачу. В проекте рассматриваются несколько вариантов.

*ESP*32 – современный и энергоэффективный, с двумя ядрами, встроенными *Wi-Fi* и *Bluetooth*, поддерживает режим глубокого сна ($3-6 – базовые платы (*AliExpress*)) [8]. Подходит для *IoT*-устройств, позволяет передавать данные без дополнительных модулей.

*Arduino Mega* – много цифровых и аналоговых входов, поддерживает разные интерфейсы связи. Но менее энергоэффективен и требует дополнительных модулей для беспроводной связи (1,215–1,831 □ – на российских маркетплейсах) [10].

*Raspberry Pi* – полноценный мини-компьютер с *Linux*. Подходит для сложной обработки и больших объёмов данных, но потребляет больше энергии и хуже подходит для автономных систем ($35-45 – *Raspberry Pi* 4B / *Pi* 5 (базовая цена)) [9].

Наиболее оптимальный выбор для проекта – ESP32, так как он сочетает производительность, энергоэффективность и встроенные средства связи.

**5.Схема питания системы и Автономное энергообеспечение**

Приоритет – стабильная работа без внешнего подключения. Энергия генерируется солнечной панелью (5–20 Вт) и накапливается в *LiFePO*4 –

аккумуляторе (3,2 В), устойчивом к температурным скачкам и безопасном в эксплуатации. Резервный контур предусматривает питание от сети. Расход оптимизирован за счёт *LDO*-стабилизатора (3,3/5 В), периодического опроса датчиков и глубокого сна *ESP*32 между циклами. Зарядка управляется *MPPT*-контроллером для максимизации эффективности. Такая схема гарантирует надёжную автономность даже в удалённых локациях [11].

**6.Беспроводная передача данных**

Для телеметрии применяются три радиоинтерфейса. *Wi-Fi* (на базе *ESP*32) обеспечивает скорость до 150 Мбит/с, но эффективен лишь в радиусе ~50 м – оптимален при размещении пасеки рядом с инфраструктурой. *LoRa/LoRaWAN* предлагает дальность связи до 15 км при минимальном энергопотреблении, что идеально для удалённых объектов. *BLE* используется локально – для настройки и диагностики через смартфон. В качестве транспортных протоколов для облачной интеграции задействованы *MQTT* (лёгкий, с низким трафиком) и *HTTP* (универсальный, но более ресурсоёмкий). Выбор стека технологий определяется дистанцией, доступностью интернета и требованиями к автономности [12].

**7.Программное обеспечение и визуализация.**

Встроенное ПО разрабатывается в *Arduino IDE* или *PlatformIO* и прош ивается в контроллер. Алгоритм циклически опрашивает датчики, обрабатывает показания и формирует телеметрические пакеты. Для снижения энергозатрат передача в облако выполняется накопительно, а не в реальном времени. Серверная часть (*ThingSpeak*, *Blynk*) визуализирует параметры в виде графиков и автоматически генерирует *push*-уведомления при фиксации критических событий (перегрев, роение) [13].

**8.Алгоритм работы.**

Работа системы происходит циклически. Сначала устройство пробуждается из режима сна, затем опрашивает датчики, обрабатывает данные, и отправляет их по сети. После этого снова уходит в сон. Такой цикл повторяется каждые 10–15 минут.

**9.Практическое применение.**

Система дает решать реальные задачи: контролировать температуру в улье, отслеживать сбор мёда, определять роение по звуку, и анализировать данные для увеличения дохода пасеки.

**10.Минусы и недостатки «Умного Улья» для пчеловодства.**

10.1 Финансовые и экономические ограничения.

*Таблица 1*

| | |
|---|---|
| **Высокая начальная стоимость** | Комплект «Умный Улей» стоит $150-200 + ежемесячная оплата тарифа за СМС ($1–4) *rosstip.ru* |
| **Дополнительные расходы** | Опции: аккумуляторы большой ёмкости (+$10–13), солнечная батарея (+$14), выносная антенна (+$5) |

### 10.2 Технические и эксплуатационные проблемы

*Таблица 2*

| | |
|---|---|
| **Ограниченное время автономной работы** | Стандартный аккумулятор (~1000–1200 мА·ч) работает ~1 месяц, требуется регулярная подзарядка *www.pchelovod.info* |
| **Зависимость от связи** | В удалённых локациях возможны проблемы с *GSM/LoRa*-сигналом, особенно в металлических павильонах community.smartthings.com |
| **Надёжность сенсоров** | Датчики могут давать сбои из-за влажности, перепадов температур, загрязнения *www.planetbee.org* |
| **Сложность устройства** | «Умный Улей» – сложное электронное устройство, требующее технической поддержки и знаний для настройки *www.pchelovod.info* |

### 10.3 Проблемы с данными и аналитикой

*Таблица 3*

| | |
|---|---|
| **Качество данных** | Показания могут искажаться из-за погодных условий, помех, неточной калибровки весов |
| **Зависимость от ПО** | Требуется регулярное обновление *firmware*, возможна несовместимость с новыми устройствами *www.pchelovod.info* |
| **Конфиденциальность** | Передача данных через облако вызывает вопросы о защите информации о пасеке |

### 10.4 Влияние на пчёл и практические ограничения

*Таблица 4*

| | |
|---|---|
| **Стресс для пчёл** | Частая замена батарей или обслуживание оборудования может тревожить колонию *escholarship.org* |
| **Не заменяет осмотр** | Технология не исключает необходимости личных проверок ульев, особенно при подозрении на болезни *science.mail.ru* |
| **Сложность масштабирования** | При увеличении количества ульев растёт сложность управления данными и обслуживания оборудования *MDPI* |

**Выводы**

В результате мы разработали комплексную систему умного улья. Она объединяет датчики, микроконтроллер и беспроводную связь. Система

энергонезависима благодаря солнечной панели. Практическая ценность – снижение потерь и повышение продуктивности. В перспективе возможно использование машинного обучения для прогнозирования заболеваний и роения.

## Библиографический список


1. Умные ульи: современный взгляд на пчеловодство [Электронный ресурс] // Своё Фермерство. – URL: https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/articles/umnye-ul-i-sovremennyj-vzgljad-na-pchelovodstvo-2 (дата обращения: 01.05.2026).
2. Интернет вещей в быту: от теории к практике [Электронный ресурс] // Хабр. – 2018. – URL: https://habr.com/ru/articles/431642/ (дата обращения: 01.05.2026).
3. Умные ульи: технологии на службе пчеловодства [Электронный ресурс] // СибАгро. – URL: https://www.sibagro.ru/articles/umnye-uli/ (дата обращения: 01.05.2026).
4. DHT22 Temperature & Humidity Sensor (датчик Waveshare) [Электронный ресурс] // Чип и Дип: интернет-магазин. – URL: https://www.chipdip.ru/product/dht22-temperature-humidity-sensor-datchik-waveshare-9000287173 (дата обращения: 01.05.2026).
5. Датчик температуры и влажности SHT31 [Электронный ресурс] // CompactTool. – URL: 5. https://compacttool.ru/datchik-temperatury-i-vlazhnosti - sht31 (дата обращения: 01.05.2026).
6. Практическое применение IoT в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] // Хабр. – 2019. – URL: https://habr.com/ru/articles/448274/ (дата обращения: 01.05.2026).
7. Иванов А. А. Цифровые технологии в агропромышленном комплексе: перспективы и вызовы [Электронный ресурс] : науч. докл. / НИУ ВШЭ. – М., 2023. – URL: https://olymp.hse.ru/mirror/pubs/share/921201536.pdf (дата обращения: 01.05.2026).
8. Умный дом и IoT: современные решения для автоматизации [Электронный ресурс] // Хабр. – 2024. – URL: https://habr.com/ru/articles/940098/ (дата обращения: 01.05.2026).
9. ThingSpeak: платформа для IoT-проектов [Электронный ресурс] // MathWorks. – URL: https://thingspeak.mathworks.com/ (дата обращения: 01.05.2026).
10. Пчеловоды против микроконтроллеров или о пользе ошибок IoT [Электронный ресурс] // Хабр. – 2018. – URL: https://habr.com/ru/articles/431642/ (дата обращения: 01.05.2026).
11. Умное управление энергопотреблением через IoT [Электронный ресурс] // Volts Battery. – URL: https://voltsbattery.ru/statii/umnoe-upravlenie-energopotrebleniem-cherez-iot/ (дата обращения: 01.05.2026).

12. Протоколы передачи данных IoT [Электронный ресурс] // IoT.ru : энциклопедия. – URL: https://iot.ru/wiki/protokoly-peredachi-dannykh-iot (дата обращения: 01.05.2026).

13. Blynk Documentation [Электронный ресурс] // Blynk.io. – URL: https://docs.blynk.io/ (дата обращения: 01.05.2026).

14. Суворин, А. В. Умный улей. Рекомендации, советы и ответы на вопро сы / А. В. Суворин. — М. : Издательство, 2023. — 128 с.

© Нургалеев Т.Н., Муталлапов Т.А., 2026

УДК 621.317.39

А.Б. НАСИБУЛЛИН
*nasibullin.4rtem@yandex.ru*
Науч. руковод. – докт. техн. наук, зав. каф. А.Ю. ДЕМИН

***Уфимский университет науки и технологий***

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УРОВНЕМЕР

*Аннотация*. В данной статье рассматривается ультразвуковой уровнемер жидкости с беспроводной передачей данных. Проведён обзор существующих методов построения уровнемеров на основе готовых ультразвуковых модулей и промышленных решений, выявлены их основные недостатки.

*Ключевые слова*: ультразвуковой уровнемер; пьезоэлектрический преобразователь; микроконтроллер; операционный усилитель; температурная компенсация; беспроводная передача данных; RS-485.

### Введение

Контроль уровня жидкости в резервуарах является распространённой задачей в промышленности и быту. Резервуары с водой, топливом, химическими реагентами требуют непрерывного мониторинга во избежание переполнения или опустошения. При этом наиболее перспективными считаются бесконтактные методы измерения, не требующие погружения датчика в измеряемую среду.

Среди бесконтактных методов ультразвуковой метод выделяется простотой реализации, независимостью от цвета, прозрачности и большинства физико-химических свойств жидкости, а также высокой надёжностью при длительной эксплуатации. Принцип основан на измерении времени двойного пробега ультразвукового импульса от излучателя до поверхности жидкости и обратно.

Существующие решения для ультразвукового измерения уровня имеют ряд ограничений. Целью данной работы является разработка устройства, лишённого этих ограничений, с обоснованным выбором элементной базы каждого функционального блока.

**Обзор современных решений**

Рассмотрим основные подходы к построению ультразвуковых уровнемеров.

**Готовые ультразвуковые модули.**

Наиболее распространённым решением для любительских и мелкосерийных разработок являются готовые ультразвуковые модули, например HC-SR04 (рис. 1). Такой модуль содержит в едином корпусе генератор несущей частоты 40 кГц, излучающий и приёмный пьезопреобразователи, аналоговый усилитель и компаратор. Управление осуществляется через интерфейс TRIG/ECHO: подача импульса длительностью 10 мкс на вход TRIG вызывает излучение пакета из 8 импульсов, после чего на выходе ECHO формируется импульс, длительность которого пропорциональна расстоянию.

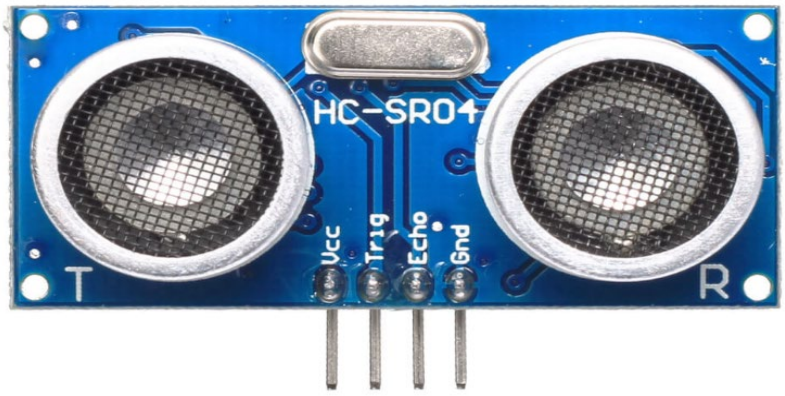



*Рис. 1.* Ультразвуковой дальномер HC-SR04

Основные недостатки готовых модулей:

1. Фиксированное усиление — нет возможности адаптировать тракт под конкретное расстояние или условия.
2. Для температурной компенсации скорости звука требуется отдельный цифровой датчик (например, DS18B20), точность которого ±0,5°C вносит погрешность по расстоянию до 0,88 мм при D = 1 м.
3. Совмещённый излучатель и приёмник в одном корпусе создаёт паразитную связь между каналами.

**Промышленные ультразвуковые уровнемеры.**

Промышленные приборы таких производителей, как Pepperl+Fuchs, Siemens, VEGA, обеспечивают высокую точность (±1–3 мм) и надёжность, однако их стоимость составляет от 15 до 150 тысяч рублей. Для малых резервуаров объёмом до нескольких сотен литров применение промышленного уровнемера экономически нецелесообразно. Кроме того, большинство промышленных приборов не оснащены встроенным беспроводным каналом передачи данных.

**Самодельные решения на Arduino.**

Популярный вариант – HC-SR04 в связке с Arduino UNO и радиомодулем NRF24L01. Основные ограничения: тактовая частота ATmega328P (16 МГц) даёт погрешность дискретности таймера. Базовая версия NRF24L01 обеспечивает дальность лишь до 100 м, что недостаточно для промышленных объектов. Отсутствует проводной интерфейс для интеграции в АСУ ТП.

Таким образом, существующие решения либо не позволяют оптимизировать параметры отдельных блоков, либо имеют высокую стоимость. Предлагается построить ультразвуковой уровнемер из дискретных компонентов с обоснованным выбором каждого элемента.

**Выбор элементной базы**

**Микроконтроллер.** Для управления устройством выбран STM32F303CCT6 — 32-разрядный микроконтроллер с ядром ARM Cortex-M3. Его главное преимущество — наличие встроенного аппаратного компаратора, что позволяет не устанавливать отдельную микросхему для детектирования эхо-сигнала. Таймер с ШИМ-выходом формирует несущую частоту 40 кГц непосредственно на пине микроконтроллера.

**Пьезоэлектрические преобразователи.** В отличие от готовых модулей, в данном устройстве применяются раздельные датчики для излучения (MA40S4S) и приёма (MA40S4R) производства Murata. Это исключает паразитную связь между каналами и позволяет начинать приём сигнала немедленно после излучения, что расширяет диапазон измерений.

**Усилитель приёмного тракта.** Принятый датчиком сигнал усиливается двухкаскадным усилителем на операционном усилителе OPA2134 (Texas Instruments). Применение двух последовательных каскадов с малошумящим ОУ позволяет получить высокий суммарный коэффициент усиления без значительного роста шума.

**Датчик температуры.** Скорость звука в воздухе зависит от температуры, поэтому без компенсации погрешность на дистанции 1 м при изменении температуры на 10°C составит около 18 мм. Вместо широко применяемого DS18B20 выбран датчик LMT01 (Texas Instruments) с импульсным выходом и точностью ±0,1°C — это в пять раз точнее DS18B20. При этом подключение проще: всего два провода без протокола 1-Wire.

**Беспроводной канал связи.** Применяется радиомодуль NRF24L01 с встроенными усилителем мощности и малошумящим усилителем приёмника (версия +PA+LNA). По сравнению с базовой версией дальность увеличивается с 0,1 до 1 км. Протокол со встроенной проверкой контрольной суммы гарантирует достоверность доставки пакетов.

**Проводной интерфейс RS-485.** Для интеграции в промышленные системы управления предусмотрен проводной канал на микросхеме MAX485. Интерфейс RS-485 является промышленным стандартом с дальностью до 1200 м, высокой помехозащищённостью и поддержкой большинством АСУ ТП. Данные передаются в удобном текстовом формате CSV.

**Разъёмное соединение.** Датчики расположены над резервуаром, а плата контроллера — снаружи. Для соединения применяется авиационный разъём GX16-6 со степенью защиты IP65, рассчитанный на работу во влажных условиях. Разъём позволяет быстро заменять датчики без перепайки.

**Принцип работы устройства**

Устройство состоит из двух блоков, связанных радиоканалом.

**Блок измерения (узел TX)** располагается у резервуара. Микроконтроллер STM32F303CCT6 периодически излучает ультразвуковой пакет через датчик MA40S4S и ожидает отражённый сигнал на приёмнике MA40S4R. Усиленный OPA2134 эхо-сигнал детектируется встроенным компаратором. По времени пробега и текущей температуре, измеренной датчиком LMT01, вычисляются расстояние до поверхности жидкости и уровень заполнения резервуара. Результат упаковывается в пакет и передаётся по радиоканалу.

**Блок отображения (узел RX)** располагается у оператора. Микроконтроллер STM32F103C8T6 принимает пакет, отображает данные на OLED-дисплее и одновременно передаёт их по интерфейсу RS-485 в систему управления. При потере связи на экране появляется предупреждение.

**Сравнение с существующими решениями**

Сравнение предлагаемого устройства с рассмотренными аналогами приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение ультразвуковых уровнемеров

| **Параметр** | **HC-SR04 + Arduino** | **Пром. уровнемер** | **Предлагаемое устройство** |
|---|---|---|---|
| Тип УЗ тракта | Готовый модуль | Готовый модуль | Дискретные компоненты |
| Микроконтроллер | ATmega328P | Проприетарный | STM32F303CCT6 |
| Датчик температуры | DS18B20, ±0,5°C | Встроенный | LMT01, ±0,1°C |
| Погрешность при D = 1 м | 0,88 мм | < 0,5 мм | ~ 0,3 мм |
| Беспроводной канал | NRF24L01, 100 м | Нет / доп. модуль | NRF24L01+PA+LNA, 1000 м |
| Проводной канал | Нет | RS-485 | RS-485 |
| Защита подключений | Нет | IP67 и выше | GX16-6, IP65 |
| Стоимость, руб. | ~ 800 | от 15 000 | ~ 3 500 |

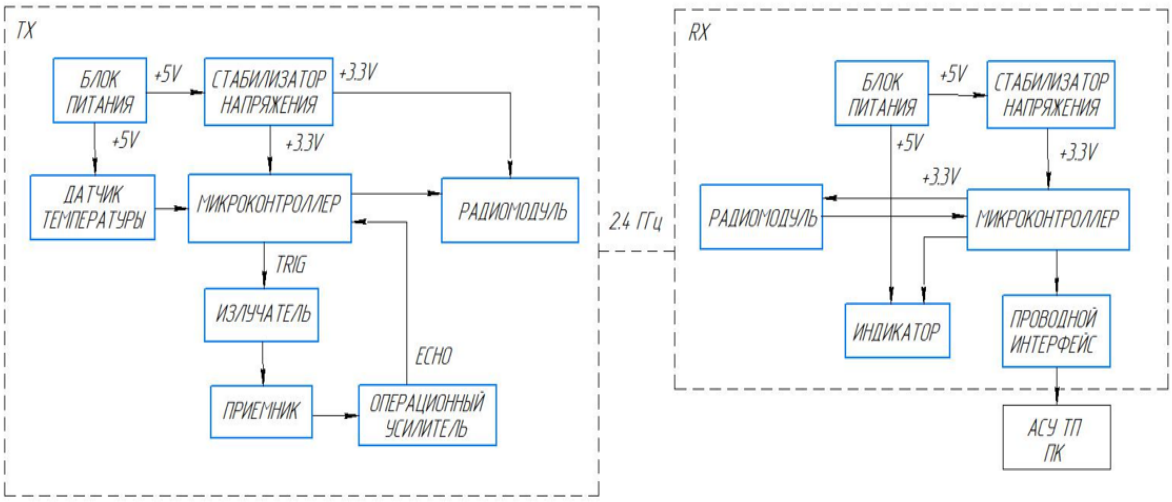



*Рис. 2.* Функциональная схема блока.

**Преимущества разработки**

По сравнению с готовыми модулями HC-SR04 разработанное устройство позволяет оптимизировать усиление приёмного тракта под конкретные условия.

Датчик LMT01 компенсирует температурную погрешность в 5 раз точнее DS18B20, при этом подключается проще. Радиомодуль с усилителем мощности даёт дальность 1000 м против 100 м у базовой версии. Интерфейс RS-485 позволяет подключить устройство напрямую к промышленной АСУ ТП без дополнительных шлюзов, что недоступно в решениях на Arduino. Стоимость устройства составляет около 3500 рублей — в 4 раза дешевле начального ценника промышленных аналогов.

## Библиографический список

1. Муратова, Н. Т. Ультразвуковые измерения в промышленности: учебное пособие / Н. Т. Муратова. – М.: Машиностроение, 2008. – 312 с.

2. HC-SR04 Ultrasonic Ranging Module [Электронный ресурс]: техническое описание. – Режим доступа: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

3. OPA2134 Datasheet. Texas Instruments, 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2134.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

4. LMT01 Datasheet. Texas Instruments, 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmt01.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

5. NRF24L01+ Datasheet. Nordic Semiconductor, 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

6. STM32F303CCT6 Reference Manual RM0316. STMicroelectronics, 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0316.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

7. MAX485 Datasheet. Maxim Integrated, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

8. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Мир, 2003. – 704 с.

9. Информация о промышленных уровнемерах Pepperl+Fuchs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pepperl-fuchs.com/ru/ru/ultrasonic-sensors.htm (дата обращения: 30.04.2026).

© Насибуллин А.Б., 2026

УДК 621.396.4

И.И. НАЗАРОВ
nazarovila297@internet.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

## МОДУЛЬ LORA E32-915T30S И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БПЛА

*Аннотация.* В статье рассматривается технология LoRa и её применение в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Анализируется модуль E32-915T30S, его характеристики, преимущества и недостатки по сравнению с аналогами. Обосновывается перспективность использования данного модуля для управления дронами в условиях сельского хозяйства, поисково-спасательных операций и мониторинга удалённых территорий.

*Ключевые слова:* LoRa; E32-915T30S; БПЛА; дальняя связь; помехоустойчивость; энергопотребление; беспилотные технологии.

### Введение

Современное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предъявляет высокие требования к системам связи: дальность, помехозащищённость, энергоэффективность и массогабаритные характеристики. Технология LoRa (Long Range) изначально создавалась для интернета вещей, однако её уникальные свойства делают её привлекательной и для управления дронами, особенно в условиях отсутствия сотовой связи или сильной загруженности традиционных диапазонов.

В статье рассматривается модуль E32-915T30S производства компании EBYTE, работающий в диапазоне 915 МГц, и оцениваются перспективы его интеграции в радиоканалы управления БПЛА.

## Модули LoRa. Особенности технологии LoRa

LoRa – это физический уровень передачи данных с модуляцией на основе расширения спектра с линейной частотной модуляцией (Chirp Spread Spectrum). Благодаря этому технология обеспечивает:

- **Дальность связи** – до 15–20 км на открытой местности (в реальных условиях для БПЛА – до 5–10 км при прямой видимости).
- **Энергетическую эффективность** – потребление передатчика около 1 Вт при мощности 30 дБм, что критически важно для миниатюрных дронов.
- **Устойчивость к узкополосным помехам** – сигнал LoRa остаётся различимым даже при уровне помех ниже уровня шума.

Для управления БПЛА это означает возможность отказа от дорогих и сложных радиомодемов и перехода на доступные, лёгкие и малопотребляющие OEM-модули.

## Разновидности модулей LoRa

На рынке представлено множество модулей. В таблице 1 приведено сравнение трёх популярных решений: E32-433T30S, SX1276 (чип) и E32-915T30S.

*Таблица 1 – Сравнение характеристик модулей LoRa*

| Параметр | E32-433T30S | SX1276 (чип) | E32-915T30S |
|---|---|---|---|
| Частота (МГц) | 433 | 137–1020 (гибкая) | 915 |
| Мощность (дБм) | 30 (1 Вт) | до 20 (100 мВт) | 30 (1 Вт) |
| Дальность (км) | ~20 | ~10 | ~20 |
| Чувствительность (дБм) | -148 | -148 | -148 |
| Потребление Tx мА) | ~450 | ~120 | ~450 |
| Вес (г) | 15–20 | 3–5 (чип) | 15–20 |
| Интерфейс | UART (готовый) | SPI (требует настройки) | UART (готовый) |
| Стоимость (руб.) | 2000–4000 | 500–1500 | 1500–3000 |

Как видно из таблицы, E32-915T30S сочетает высокую выходную мощность (30 дБм), хорошую чувствительность и готовый UART-интерфейс,

что упрощает интеграцию в полётный контроллер. Диапазон 915 МГц менее загружен в России и странах СНГ по сравнению с 433 МГц, где работают многие бытовые устройства.

### Проблема загрязнённости частот

В городской среде диапазоны 433 МГц и 868 МГц часто перегружены радиобрелоками, сигнализациями, ключами доступа. Это приводит к снижению дальности и росту числа потерянных пакетов. Диапазон 915 МГц для большинства регионов РФ является менее используемым, что даёт модулю E32-915T30S дополнительное преимущество.

Однако важно помнить: на территории России использование частоты 915 МГц требует проверки действующих ограничений ГКРЧ. В рамках научно-исследовательских и экспериментальных работ применение таких модулей допустимо при малой выходной мощности и соблюдении режимов излучения.

### Применение модуля E32-915T30S в управлении БПЛА

Модуль может быть использован в двух основных сценариях:

1. **Канал передачи команд телеметрии** – с небольшим потоком данных (до 20–30 кбит/с), но с высокой надёжностью.
2. **Резервный канал аварийного возврата** – при потере основного канала (например, 2,4 ГГц или 5,8 ГГц).

В аграрной отрасли (обследование полей, картографирование) дрон может удаляться на 5–10 км от оператора. Модуль E32-915T30S позволяет сохранять уверенный приём команд и получение телеметрии. В поисково-спасательных операциях в лесистой или горной местности LoRa обеспечивает прохождение сигнала за счёт низкой несущей частоты и помехоустойчивой модуляции.

### Пример структурной схемы подключения

Типовое включение модуля E32-915T30S к полётному контроллеру (например, Pixhawk или Cube Orange) осуществляется через UART. Для питания необходим стабилизированный источник 3,3–5 В с током до 500 мА в момент передачи. Антенна – четвертьволновой штырь (≈8 см на 915 МГц) или компактная спиральная антенна, закреплённая на раме дрона.

На пульте управления используется второй такой же модуль, подключённый к наземной станции (планшету или ноутбуку через USB-UART переходник). Применение направленной антенны (например, Yagi на 8–10 дБи) позволяет увеличить дальность до 20–30 км при условии прямой видимости.

Возможности LoRa особенно актуальны для использования в аграрной отрасли, поисково-спасательных операциях, а также для исследования удалённых территорий и других сферах.

### Экономическая и массогабаритная целесообразность

Стоимость двух модулей E32-915T30S (бортовой + наземный) составляет около 3000–6000 рублей, что в несколько раз дешевле промышленных телеметрических модемов. Вес модуля с антенной и проводами – не более 25 г,

что незначительно влияет на полётное время типичного мультикоптера класса 4–5 кг.

Энергопотребление в режиме приёма – около 15–20 мА, в режиме передачи (при 30 дБм) – до 450 мА. Для большинства полётов длительностью 20–30 минут доля времени передачи мала (команды отправляются редко, телеметрия – с периодом 0,5–1 с), поэтому средний ток не превышает 50–80 мА, что вполне допустимо.

**Ограничения и пути их преодоления**

Главные ограничения LoRa применительно к БПЛА:

- Низкая скорость передачи данных (не подходит для видеопотока).
- Необходимость прямой видимости для максимальной дальности.
- Возможные помехи от других LoRa-устройств.

Тем не менее, для управления дроном и приёма телеметрии скорости 5–10 кбит/с более чем достаточно. Видео при этом передаётся по отдельному аналоговому или цифровому каналу (5,8 ГГц).

**Заключение**

Рассмотрев модули семейства LoRa, в частности E32-915T30S, можно сделать следующие выводы:

1. Модуль представляет собой отличное решение для организации радиоканала управления БПЛА, особенно в условиях удалённой или частотно-загрязнённой местности.
2. Он обеспечивает дальнодействующую связь (до 20 км), высокую устойчивость к помехам и низкое энергопотребление в режиме ожидания.
3. Применение E32-915T30S в пультах управления беспилотниками расширяет их функциональные возможности и снижает стоимость системы связи по сравнению с промышленными аналогами.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку адаптивного протокола переключения скорости LoRa в зависимости от качества канала, а также на совместное использование LoRa с другими частотными диапазонами для повышения отказоустойчивости.

**Библиографический список**

1. EBYTE. Datasheet E32-915T30S SX1276 915MHz 1W UART module [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ebyte.com (дата обращения: 20.04.2025).
2. Семенов, А. В. Технологии LPWAN в беспилотной авиации / А. В. Семенов, Д. И. Котов // Беспилотные системы. – 2024. – № 2. – С. 34–40.
3. Хофманн, К. LoRa для реальных приложений / К. Хофманн. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 210 с.
4. Баскаков, С. С. Расчёт дальности связи LoRa в условиях пересечённой местности / С. С. Баскаков // Радиотехника. – 2024. – № 5. – С. 12–18.

© Назаров И.И., 2026

УДК 621.311.6

Д.И. ПУТИНЦЕВ
*putintsevdi@gmail.com*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ЗАДАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МЫШЦ

***Аннотация.*** В статье изучается возможность использования генератора заданной электрической мощности в составе измерительных систем для мониторинга состояния мышц. Установлено, что такой подход способствует поддержанию стабильного энергетического режима измерений, минимизирует влияние сопротивления объекта и обеспечивает повышение точности и воспроизводимости получаемых данных. Для разрабатываемого устройства диапазон сопротивления нагрузки составляет от 1 до 100 кОм, а мощность генератора не превышает 100 мВт, что соответствует безопасной электродиагностики.

***Ключевые слова:*** измерительные системы, генератор мощности, электрические измерения, электродиагностика, сопротивление нагрузки.

Работа с биологическими объектами в измерительных системах осложняется переменным электрическим сопротивлением таких объектов, что делает поддержание стабильности электрических параметров воздействия крайне важной задачей [1, 2].

Во время электрических измерений сопротивление биологических тканей способно изменяться в широких пределах — на него влияют физиологическое состояние, температура и условия контакта электродов [3]. При использовании традиционных источников тока или напряжения это приводит к нестабильности рассеиваемой мощности в нагрузке.

Мощность электрического воздействия определяется выражением:

$$P = UI$$

При этом техническими требованиями установлено, что максимальная мощность воздействия не должна превышать 100 мВт, а максимальный ток ограничен 25 мА. Это необходимо для обеспечения безопасности пациента и исключения нежелательного теплового воздействия на ткани.

Следовательно, при изменении сопротивления нагрузки происходит изменение энергетического режима измерения, что приводит к следующим проблемам:

1. Увеличение погрешности измерений;
2. Снижению воспроизводимости результатов;
3. Зависимости результатов от параметров объекта;

**4.** Нестабильности условий эксперимента.

Таким образом, традиционные методы формирования электрического сигнала не обеспечивают постоянства энергетического воздействия [4].

**Применение генератора заданной мощности**

Для поддержания стабильного режима измерений целесообразно применить генератор заданной электрической мощности, который гарантирует постоянство мощности на нагрузке вне зависимости от её сопротивления.

Для рассматриваемой системы генератор должен обеспечивать работу в диапазоне сопротивлений от 1 до 100 кОм, при поддержании мощности до 100 мВт и частоте импульсов от 1 до 1000 Гц. Длительность импульсов изменяется в пределах от 0,02 мс. до 500 мс., что позволяет проводить как диагностику, так и электростимуляцию.

В отличие от классических источников:

- Генератор напряжения поддерживает $U = const$;
- Генератор тока поддерживает $I = const$;

Генератор мощности реализует условие:

$$P = const$$

Достижение данного результата обеспечивается посредством системы обратной связи, которая динамически корректирует выходные параметры сигнала в соответствии с текущим значением сопротивления нагрузки. [5,6].

**Преимущества с точки зрения электроизмерений**

Использование генератора заданной мощности в измерительных системах позволяет:

**1.** Снизить погрешность измерений за счёт стабилизации энергетического режима. Благодаря этому уменьшается влияние изменяющихся параметров нагрузки [1].

**2.** Повысить воспроизводимость результатов за счёт обеспечения одинаковых условий измерения при повторных экспериментах [5].

**3.** Обеспечить независимость от сопротивления нагрузки благодаря изменению электрических свойств объекта, которые не влияют на величину подводимой мощности.

**4.** Повысить корректность измерений за счёт исключения влияния внешних факторов, таких как температура и влажность.

Традиционные методы измерений в условиях нелинейных и изменяющихся электрических характеристик объекта приводят к существенным отклонениям результатов, в то время как применение генераторов заданной мощности оказывается значительно более эффективным.

Поддержание постоянной мощности позволяет унифицировать энергетический режим измерительного процесса, что служит существенным условием повышения точности электрических измерений [5,6].

Данный подход позволяет корректно сопоставлять результаты, полученные в различных экспериментальных условиях, что существенно важно для анализа динамических процессов.

В работе исследовано применение генератора заданной электрической мощности в измерительных системах контроля состояния мышц, которое способствует повышению точности, воспроизводимости и стабильности электрических измерений. Предложенное решение перспективно для разработки современных измерительных систем, взаимодействующих с объектами, обладающими переменными электрическими параметрами.

**Библиографический список**

1. Кузнецов В.В. Электрические измерения и основы метрологии. – М.: Высшая школа, 2010.

2. Ким К.К., Сорокин В.В. Основы электрических измерений. – СПб.: Питер, 2012.

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Гардарики, 2007.

4. Насонов В.С. Радиоизмерительные приборы. – М.: Советское радио, 1979.

5. Гусев В.Г., Зеленов С.А. Основы построения генераторов заданной мощности // Измерительная техника. – 2005. – №7. – С. 12–16.

6. Демин А.Ю., Пашали Д.Ю., Заманова Г.И., Нафикова Р.М. Адаптация диагностики по методу И. Накатани к использованию измерительных генераторов заданной электрической мощности и цифровой обработки данных // CyberLeninka. [Электронный ресурс].URL: https://cyberleninka.ru/article/n/adaptatsiya-diagnostiki-po-metodu-i-nakatani-k-ispolzovaniyu-izmeritelnyh-generatorov-zadannoy-elektricheskoy-moschnosti-i/viewer

© Путинцев Д.И., 2026

УДК 621.311.6

А.Р. САФИНА
*angelina10020906@mail.ru*
Науч. руководов. – старший преподаватель Е.В. ЛАРИОНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Аннотация. И*сточники питания для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — это системы, обеспечивающие электроэнергией двигатели, бортовую электронику, системы управления и другие компоненты аппарата. В статье говориться про эффективность использование и различия источников питания для (БПЛА).

*Ключевые слова:* источники питания, эффективность, различия.

## Введение

Актуальность заключается в том, что в данный момент БПЛА востребованы во многих сферах и отраслях. Чаще всего это связано с развитием технологий, преодоление физических ограничений, и расширением областей применения БПЛА.

Источник питания чаще всего рассматривают в качестве увеличения времени полёта и автономности: найти источник энергии, который обеспечит максимальное время полёта при минимальном увеличении массы и объёма БПЛА.

Выбор между аккумулятором, топливным элементом или двигателем внутреннего сгорания определяет не только продолжительность полёта, но и грузоподъёмность, надёжность, а также сферу применение аппарата.

Но чаще всего источники питания для БПЛА во многом зависят от типа установки: КПД аккумуляторов более 70% (делает оптимальным выбором для малых и средних БПЛА, где важна быстрая отдача энергии при взлёте и манёврах).

КПД топливного элемента – около 45% (преобразуют химическую энергию в электрическую напрямую, действуя значительно эффективней генерации). КПД двигателя внутреннего сгорания – около 40% (Не смотря на низкий КПД, ДВС сохраняется актуальной для тяжёлых и дальних БПЛА благодаря высокой энергетической плотности жидкого топлива).

## Описание источника питания

Источник питания состоит из топливных элементов, образуя химическую энергию водорода в электрическую без горения.

Традиционное производство электроэнергии сопровождается поэтапным процессом преобразования энергии: химическо-терминальным, терминально-механическим, механически-электрическим.

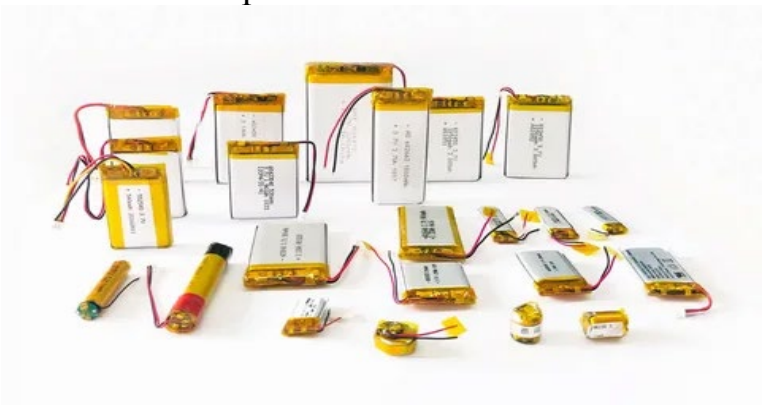


*Рис. 1. Примеры источников питания БПЛА*

Основные требования к топливному источнику питания: удельная теплоёмкость удельная мощность (важны параметры и минимальная масса), объём топливного бака (увеличение объёма топлива повышает общий вес летательного аппарата, тем самым снижая дальность полёта), безопасность и надёжность (при использовании водорода требуются специальные сосуды и требования к ним для его хранения).



*Рис. 2. Сравнительные характеристики Li-Ion батареи*

Топливный источник питания выглядит как баллон с топливом, управляющий электронный блок и находится внутри БПЛА или же как отдельный модуль.

**Плюсы и минусы современных систем**

Преимущества современных источников питания:

1) Автономность (выполнение задач)
2) Гибкость и манёвренность (равномерное распределение энергии)
3) Экономия ресурсов
4) Доступ к данным

Но также существуют и серьёзные недостатки:

1) Ограниченная нагрузка и дальность (Большинство дронов не могут поднимать тяжёлое, летать дальше 30-40 минут)
2) Зависимость от погодных условий (низкие температуры, сильный ветер, критически снижают эффективность батареи).
3) Вопросы безопасности эксплуатации (аккумуляторы склонны к перегреву и возгоранию при неправильной эксплуатации)

**Прорывные разработки:**

На данный момент разработано множество источников питания, которые совершают прорыв в малой авиации:

1) Биоэлектрохимические системы (используются живые микроорганизмы и ферменты для органического топлива с выработкой электричества. Экологичность и доступность топлива делают направление перспективным для экологии).
2) Гибридные энергосистемы с кинетическим накопителями (аккумулятор и конденсатор. Где конденсатор берёт на себя нагрузки: взлёт, резкие манёвры, что позволяет продлить жизнь основному аккумулятору).
3) Термоэлектрические и пироэлектрические генераторы (преобразуют тепло и колебания температур в электричество. Такие системы могут утилизировать тепло выхлопных газов и работать от перепадов температуры окружающей среды).

4) Подводные турбины и генераторы морских течений (гибридные беспилотные комплексы, способные работать одновременно в воздушной и водной сфере. Пребывая под водой БПЛА может заряжаться от течения воды).

**Отечественные аналоги источников питания**

Частью исследования также стал анализ доступных отечественных аналогов источников питания. Найти компоненты для сборки Литий-полимерный аккумулятор в качестве примера.

Бренда: Roibtronik, Tattu R-Line , Gens Ace Bashing. Они обеспечивают высокую токоотдачу при малом весе.

Рассматривая литий-ионные батареи высокой ёмкости и длительного полёта: ISDT HV, Hypexino HV, SkyRC. Имеют большую энергетическую плотность, но уступают по пиковой токоотдаче.



*Рис. 3. Внешний вид сменных блоков аккумуляторной батареи БПЛА*

**Вывод**

Важно тщательно оценить факторы, такие как требуемая мощность, время автономной работы, вес полезной нагрузки, условия эксплуатации и допустимые риски безопасности.

Не существует универсального источника питания. Выбор зависит от конкретной задачи. Если нужна максимальная дальность при минимальном весе подойдут топливные элемента. Для динамичных маневренных полетов лучше подходят аккумуляторы. А в будущем гибридные и биоэлектрохимические системы, для снятия ограничений и нагрузки, а также безопасности.

**Библиографический список**

1. Зайцева, М. С. Технологии беспилотного транспорта [Электронный ресурс] / М. С. Зайцева. – Текст: электронный // Педагогический альманах : сетевое издание. – 2021. – 30 декабря. – URL: https://www.pedalmanac.ru/294838 (дата обращения: 01.05.2026).

2. Белик, В. В. Системы и устройства, необходимые для работы беспилотных летательных аппаратов / В. В. Белик, В. В. Долгов. – Текст : непосредственный // Современные наукоемкие технологии - основа

модернизации агропромышленного комплекса : материалы международной научно-практической конференции, 10 февраля 2021 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Донской государственный аграрный университет. – пос. Персиановский : Донской ГАУ, 2021. – С. 286-291.

3. Утляков, Г. Н. Источники питания систем электрооборудования летательных аппаратов / Г. Н. Утляков, В. М. Куляпин. – Текст : непосредственный // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2002. – Т. 3, № 2. – С. 150-155.

4. Олейников, А. Я. Обеспечение интер операбельности авиационных беспилотных летательных аппаратов / А. Я. Олейников. – DOI 10.14357/20718632210401. – Текст: непосредственный // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2021. – № 4. – С. 3-11.

© Сафина А.Р., 2026

## СЕКЦИЯ 3.2 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И АВИОНИКА

УДК 681.5

И.А. АЛЛАГУЛОВ
*allagulow2015@yandex.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент А.Л. ТИМОФЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Аннотация.* В работе представлена структура интеллектуальной системы измерения и контроля вибрации авиационного двигателя. Рассмотрены особенности вибрационных процессов в газотурбинных установках, выполнен анализ существующих средств измерения. Предложена архитектура системы, включающая измерительный тракт и модуль интеллектуальной обработки сигналов. Разработан алгоритм диагностики с элементами машинного обучения, основанный на анализе отклонений от нормального состояния. Показано, что предложенный подход позволяет повысить чувствительность к ранним дефектам и снизить вероятность ложных срабатываний.

*Ключевые слова:* вибрация, авиационный двигатель, диагностика, акселерометр, машинное обучение, мониторинг состояния.

**Введение**

Контроль вибрационных параметров является одним из наиболее эффективных методов диагностики технического состояния авиационных двигателей. Вибрация напрямую связана с динамическими процессами в узлах двигателя, включая роторные системы, подшипники и лопаточные аппараты. Современные требования к безопасности полётов и снижению эксплуатационных затрат обуславливают необходимость внедрения систем непрерывного мониторинга состояния, способных выявлять дефекты на ранних стадиях их развития. При этом эксплуатация авиационных двигателей сопровождается воздействием широкого диапазона температур, механических нагрузок и помех, что существенно усложняет задачу измерения. Традиционные системы контроля вибрации основаны на пороговых методах и спектральном анализе, однако их эффективность ограничена при работе в переменных режимах. В связи с этим актуальной задачей является разработка интеллектуальных методов обработки сигналов.

Целью работы является разработка структуры системы измерения и контроля вибрации авиационного двигателя с использованием адаптивного алгоритма диагностики.

**Особенности вибрации авиационных двигателей**

Вибрация авиационного двигателя представляет собой сложный сигнал, формируемый совокупностью механических процессов. Основными источниками вибрации являются:

– вращающиеся элементы ротора;

– подшипниковые узлы;

– аэродинамические воздействия;

– структурные резонансы конструкции.

Сигнал характеризуется широким частотным диапазоном и наличием как детерминированных, так и случайных компонентов. При этом различные типы дефектов проявляются в виде специфических изменений вибрационного спектра. К числу диагностируемых неисправностей относятся [1]:

– дисбаланс ротора;

– несоосность валов;

– износ подшипников;

– повреждение лопаток.

**Обзор средств измерения вибрации**

Для регистрации вибрационных параметров применяются различные типы датчиков [2]:

1. Пьезоэлектрические акселерометры обеспечивают высокую точность и широкий частотный диапазон, что делает их основным инструментом вибрационного контроля в авиации. Однако их работа ограничена при экстремальных температурах.

2. MEMS-датчики характеризуются компактностью и низким энергопотреблением, что позволяет использовать их в распределённых системах мониторинга. Тем не менее, их чувствительность ниже по сравнению с пьезоэлектрическими аналогами.

3. Оптоволоконные датчики представляют перспективное направление благодаря высокой помехоустойчивости и стабильности в агрессивных средах. Их применение особенно актуально в условиях сильных электромагнитных воздействий.

С учётом требований авиационной техники наиболее рациональным является использование пьезоэлектрических акселерометров в сочетании с цифровыми методами обработки сигналов.

**Структура системы измерения и контроля**

Предлагаемая система показана на рис. 1.

1. Датчик вибрации устанавливается на корпусе двигателя и преобразует механические колебания в электрический сигнал.

2. Аналоговый тракт выполняет усиление и фильтрацию сигнала, обеспечивая подавление шумов и выделение информативного диапазона частот.

3. Аналого-цифровой преобразователь осуществляет дискретизацию сигнала, после чего данные поступают в цифровой блок обработки.

4. Цифровая обработка включает выделение признаков и передачу данных в модуль диагностики, реализующий интеллектуальный алгоритм анализа состояния.

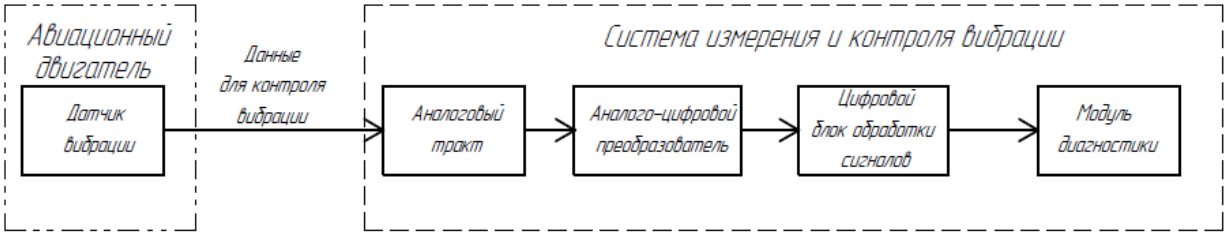



*Рис. 2.* Структурная схема системы измерения и контроля вибрации авиационного двигателя

**Интеллектуальный алгоритм диагностики**

Предлагаемый алгоритм основан на концепции адаптивного анализа вибрационного сигнала с использованием модели нормального состояния. Алгоритм включает этапы:

– предварительная обработка;

– выделение признаков;

– оценка состояния;

– принятие решения.

На первом этапе выполняется фильтрация и нормализация сигнала. Далее формируется набор информативных признаков, включающих: уровень вибрации; спектральные характеристики; изменение параметров во времени. Ключевым элементом является модель нормального состояния, формируемая на основе данных исправного двигателя. В процессе работы система сравнивает текущие параметры с эталонными. Оценка отклонения позволяет определить степень аномальности сигнала. При превышении заданного уровня формируется диагностическое сообщение [3].

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма диагностики вибрации.

В качестве модели нормального состояния применяются методы обнаружения аномалий, позволяющие выявлять отклонения без явного задания порогов. Преимуществом данного подхода является возможность адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации и учёт индивидуальных особенностей конкретного двигателя.

**Заключение**

В работе предложена структура системы измерения и контроля вибрации авиационного двигателя с использованием интеллектуального алгоритма диагностики. Разработанный подход позволяет перейти от традиционного порогового контроля к адаптивному анализу состояния, что повышает точность диагностики и снижает вероятность ложных срабатываний. Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие методов

интеллектуальной обработки данных и интеграция системы в комплексные решения мониторинга технического состояния.

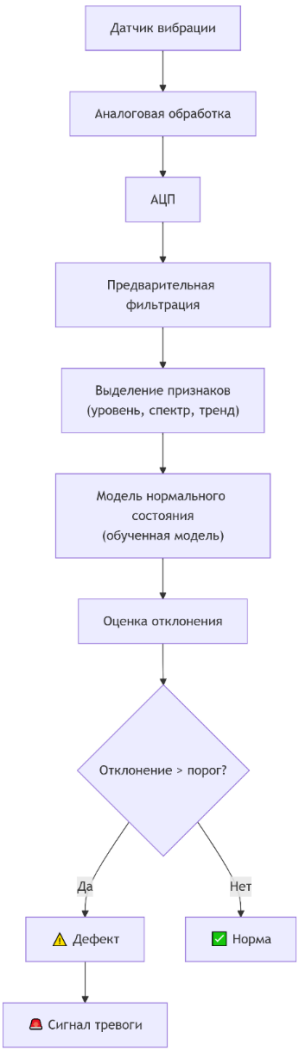



*Рис. 3.* Блок схема алгоритма

## Библиографический список

1. Арсланов Р. В. Контроль параметров вибрации газотурбинных двигателей в реальном масштабе времени / Р. В. Арсланов. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 14 с.

2. Контроль вибраций газотурбинного двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vibrometer-vp.ru/article7.html (дата обращения: 12.05.2026).

3. Technique of vibration monitoring [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/324615847_TECHNIQUE_OF_VIBRATION_MONITORING (дата обращения: 12.05.2026).

© Аллагулов И.А., 2026

УДК 681.5

Д.О. АНИСИМОВ
*a.n.i.s.d@mail.ru*
Науч. руководитель – д-р техн. наук, проф. А.Ю. ДЁМИН

***Уфимский университет науки и технологий***

# СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРОТУШЕНИЕМ ГТД НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

*Аннотация*. В работе рассматривается разработка системы контроля и управления пожаротушением газотурбинного двигателя (ГТД), реализованной на отечественной элементной базе. Предложена структура системы с использованием термопар для измерения температуры, микроконтроллера для обработки данных и интерфейса передачи информации. Обоснован выбор датчиков, рассмотрены принципы функционирования системы и алгоритмы обнаружения пожара. Разработанное решение обеспечивает высокую надежность, быстродействие и устойчивость к внешним воздействиям.

*Ключевые слова*: ГТД, пожаротушение, термопара, система контроля, микроконтроллер, измерение температуры, ARINC-429.

## Введение

Пожары в отсеках газотурбинных двигателей представляют серьезную угрозу безопасности полетов. Для их предотвращения необходимы системы, обеспечивающие оперативное обнаружение возгорания и автоматическое управление пожаротушением. В условиях импортозамещения актуальной задачей является разработка таких систем на отечественной элементной базе.

## Обзор современных решений

Современные системы контроля и управления пожаротушением газотурбинных двигателей представляют собой комплексные бортовые системы, включающие подсистемы обнаружения пожара, обработки информации и управления исполнительными устройствами.

Системы обнаружения пожара в авиации реализуются на основе различных физических принципов. Наиболее распространёнными являются:

– термочувствительные системы (термовыключатели);
– термоэлектрические системы (термопары);
– пневматические системы с газонаполненными трубками;
– непрерывные линейные датчики температуры (continuous-loop).

Термовыключатели срабатывают при достижении заданной температуры, замыкая электрическую цепь. Такие системы просты, но не позволяют отслеживать динамику изменения температуры. Термопарные системы,

напротив, реагируют на скорость изменения температуры, что обеспечивает более раннее обнаружение возгорания.

Наиболее широко в современных авиационных двигателях применяются системы непрерывного контроля температуры, основанные на линейных датчиках. Они обеспечивают контроль по всей длине контролируемой зоны и отличаются высокой надежностью.

Системы пожаротушения, как правило, являются стационарными и включают баллоны с огнетушащим веществом и распределительную систему, изображенное на рис. 1. В авиации используются системы с быстрым выбросом огнетушащего состава, обеспечивающие подавление пламени за 1–2 секунды.

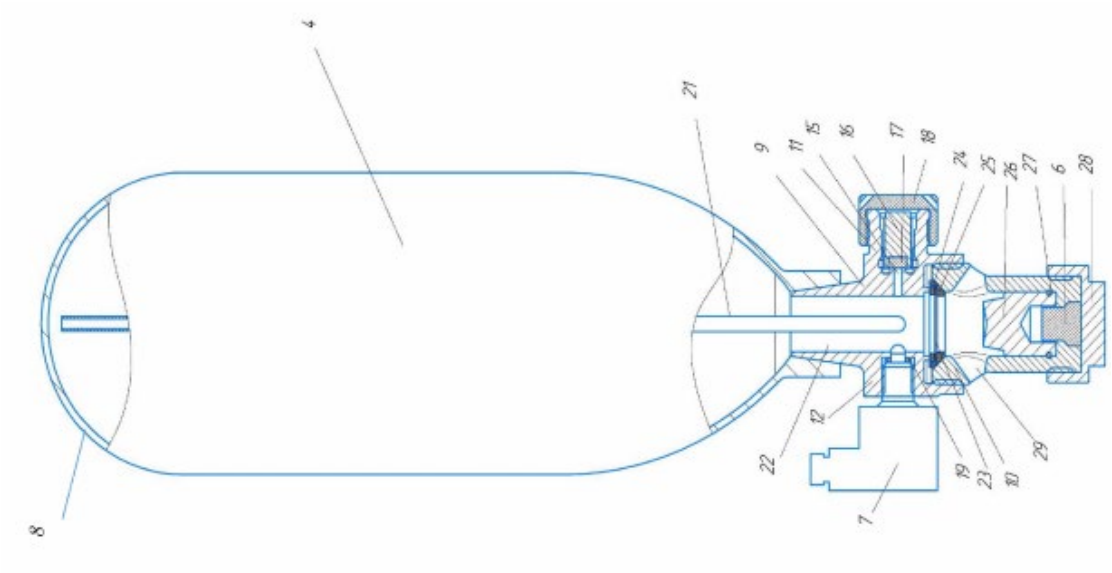



*Рис. 1.* Разрез баллона фронтальный

Современные системы интегрируются в бортовые вычислительные комплексы и передают данные по цифровым интерфейсам. Наиболее распространённым стандартом является интерфейс ARINC 429, обеспечивающий надежный однонаправленный обмен данными между бортовыми системами.

Несмотря на разнообразие методов, для систем пожаротушения ГТД ключевыми требованиями остаются:

– высокая надежность;

– помехоустойчивость;

– быстродействие;

– работоспособность при высоких температурах и задымлении.

С учетом этих требований оптимальным решением является использование термопар в сочетании с цифровой обработкой сигналов.

**Принцип работы микросхемы.**

Структурная схема разработанной системы контроля и управления пожаротушением ГТД включает несколько функциональных блоков,

обеспечивающих полный цикл обработки информации — от измерения температуры до управления исполнительными механизмами (рис. 2).

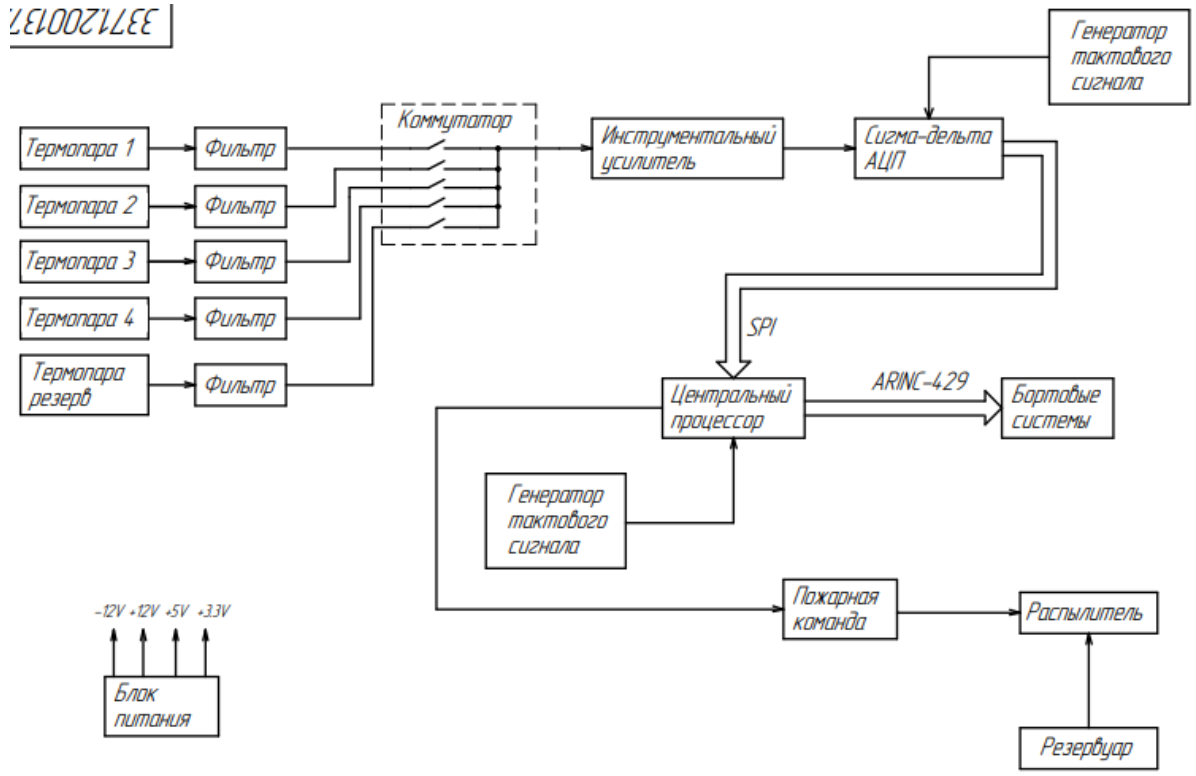



*Рис. 2.* Структурная схема СКУП ГТД

В состав системы входят следующие основные узлы:

1. Блок датчиков температуры.

В качестве первичных преобразователей используются термопары, установленные в контролируемых зонах двигателя. Они преобразуют температуру в термоэлектродвижущую силу (термоЭДС).

2. Блок коммутации каналов.

Обеспечивает поочередное подключение нескольких измерительных каналов к измерительному тракту. Это позволяет использовать один тракт обработки для нескольких датчиков.

3. Блок усиления и фильтрации.

Сигнал термопар имеет малую амплитуду и подвержен помехам, поэтому он усиливается и фильтруется. Фильтрация устраняет высокочастотные помехи и наводки.

4. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Преобразует аналоговый сигнал в цифровой код через сигма-дельта АЦП.

5. Микроконтроллерный блок.

Центральный элемент системы, выполняющий:

– сбор данных;

– обработку сигналов;

– анализ температур;

– принятие решения о пожаре;

– формирование управляющих сигналов.

6. Блок формирования команды пожаротушения.

Формирует управляющий сигнал для исполнительных механизмов (клапанов, пиропатронов и др.).

7. Интерфейсный блок (ARINC 429).

Обеспечивает передачу данных в бортовую систему самолета. Интерфейс реализует цифровую передачу данных по двухпроводной линии с высокой помехоустойчивостью.

8. Блок питания.

Обеспечивает стабилизированное питание всех элементов системы и защиту от перегрузок.

**Принцип работы блока**

Работа системы контроля и управления пожаротушением ГТД осуществляется в непрерывном режиме и включает несколько последовательных этапов обработки информации.

На первом этапе термопары, установленные в контролируемых зонах двигателя, измеряют температуру и формируют аналоговый сигнал в виде термоЭДС.

Далее сигнал поступает в блок коммутации, где происходит последовательный опрос всех измерительных каналов. Это позволяет реализовать многоканальную систему контроля при ограниченном количестве аппаратных ресурсов.

После коммутации сигнал усиливается и фильтруется. Усиление необходимо для повышения уровня сигнала до значений, пригодных для дальнейшего преобразования, а фильтрация обеспечивает подавление помех.

Затем сигнал поступает в аналого-цифровой преобразователь, где преобразуется в цифровую форму. Полученные данные передаются в микроконтроллер.

Микроконтроллер выполняет:

– вычисление текущей температуры;

– анализ скорости её изменения;

– сравнение с пороговыми значениями.

При превышении заданного температурного порога или при резком росте температуры система фиксирует факт возгорания.

После этого формируется команда на включение системы пожаротушения. Управляющий сигнал поступает на исполнительные устройства, обеспечивающие выброс огнетушащего вещества в зону пожара.

Параллельно информация о состоянии системы и измеренных параметрах передается в бортовую систему по интерфейсу ARINC 429, что обеспечивает информирование экипажа и регистрацию параметров.

Таким образом, система реализует полный цикл: измерение → обработка → принятие решения → управление → передача данных.

## Библиографический список

1. Тырышкин С. Ю. Информационно-измерительные и управляющие системы: учебное пособие для вузов / С. Ю. Тырышкин. – Москва: Издательство Юрайт, 2026. – 124 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-21481-9.

2. Тармаев А. А. Основы автоматики газотурбинных двигателей: учебное пособие / А. А. Тармаев, А. В. Родионов; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Изд-во МАИ, 2024. – 98 с. – ISBN 978-5-4316-1172-8.

3. ГОСТ 18977–79. Аппаратура бортовых комплексов летательных аппаратов. Требования к каналам информационного обмена (ARINC 429). – Москва: Издательство стандартов, 1980.

4. Патент RU 2 836 623 C1. Система пожаротушения транспортного средства / опубл. 14.01.2025.

5. Патент RU 2 740 422 C1. Способ определения момента достижения критической температурной точки в отсеке газотурбинного двигателя / опубл. 17.12.2020.

6. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков: пер. с англ. / под ред. В. И. Силантьева. – Москва; Санкт-Петербург: ЗАО «АВТЭКС», 1999. – 311 с.

7. Analog Devices. Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning [Электронный ресурс] / W. Kester (Ed.). – режим доступа: https://www.analog.com (дата обращения: 19.04.2026).

8. Техническая документация на микроконтроллер 1874ВЕ10АТ / АО «НИИЭТ» (г. Воронеж). – Режим доступа: https://niiet.ru (дата обращения: 19.04.2026).

9. Техническая документация на АЦП 5400ТР045А-025 и инструментальный усилитель 5419УС015. – Режим доступа: https://www.chipdip.ru (дата обращения: 19.04.2026).

© Анисимов Д.О., 2026

УДК 004.318:621.38

Р.И. АНТРОПОВ, Д.И. ВАЖОВ
*roman.antropov6@gmail.com*
Науч. руководитель – д-р техн. наук, проф. А.Ю. ДЕМИН

***Уфимский университет науки и технологий***

# ЭВОЛЮЦИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРОВ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

*Аннотация*. В работе рассмотрены основные этапы развития отечественной микропроцессорной техники. Проведен сравнительный анализ отечественных микропроцессоров и их зарубежных аналогов по основным техническим характеристикам. Исследованы ключевые проблемы импортозамещения в области микроэлектроники. Определены перспективные направления развития отечественной микропроцессорной отрасли.

*Ключевые слова*: микропроцессоры; микроэлектроника; импортозамещение; отечественные процессоры; RISC-V; микропроцессорная техника; технологическая независимость; электронная промышленность.

## Введение

Одним из неотъемлемых элементов в современном мире электроники являются микропроцессоры, которые обеспечивают сбор и анализ информации, связь с внешними устройствами и выполнение алгоритмов управления. Приборостроение представляет собой одну из важных отраслей промышленности, обеспечивающую разработку и производство измерительных и управляющих систем, а также для автоматизации различных сфер деятельности человека. Благодаря микропроцессорной технике стало возможным использование интеллектуализированных устройств, промышленных контроллеров, медицинских приборов и различных робототехнических систем.

В нынешних условиях изолированности Российской Федерации от официальных поставок электроники возросла актуальность развития отечественных микропроцессорных технологий в связи с активной цифровизацией промышленности и общества. Вместе с этим использование зарубежных альтернатив или компонентов несет в себе риски как технологические, так и экономические ввиду создания серьезного конкурента для национальных аналогов. Применение собственных микропроцессоров поможет обеспечить технологическую независимость и повысить конкурентоспособность российской продукции для формирования технологической инфраструктуры.

Целью данной работы является анализ развития отечественных микропроцессоров, а также рассмотрение существующих проблем и перспектив импортозамещения в данной области.

**Эволюция отечественных микропроцессоров**

Развитие отечественной микропроцессорной техники берет начало еще во времена Советского Союза в 1970-1980-х годах. Тогда были разработаны первые серии КР580 и КР1810, на базе зарубежных аналогов Intel 8080 и Intel 8086 соответственно. Они получили широкое распространение в учебных и промышленных вычислительных системах. После распада Советского Союза развитие отечественной микроэлектроники было замедлено, и основная ориентация сместилась на зарубежные решения, основанные на архитектурах x86, ARM и MIPS [1].

И только к началу 2000-х годов начала вестись разработка новых процессоров под руководством ЗАО «МЦСТ». Так, одним из первых стал МЦСТ R-100, но в серию его решили не выпускать и сразу сделать модернизацию. В результате был представлен МЦСТ R-150, основанный на архитектуре SPARC, которая была разработана изначально в 1985 году. В дальнейшем микропроцессоры семейства «Эльбрус» разрабатывались на собственной архитектуре, и в 2021 году был представлен 16-ядерный процессор «Эльбрус-16С». Однако выпуск осуществлялся на производственных мощностях зарубежных компаний.

Другим участником стала бесфабричная компания Baikal Electronics, основанная в 2012 году. Она сосредоточилась на разработке процессоров для персональных компьютеров. Первым продуктом стал процессор Baikal-T1 на основе архитектуры MIPS. Предполагалось, что на основе его будут создаваться различные сетевые устройства, такие как маршрутизаторы, устройства промышленной автоматизации и другие.

Также развивалось направление микроэлектронной промышленности в лице компании Mikron. Она занимается разработкой микросхем для промышленной автоматизации, телеметрии, интернета вещей и других областей. Особое внимание уделили открытой архитектуре RISC-V, которая не требует лицензии. И согласно данным к концу 2025 года в России было произведено более 3 миллионов микросхем.

Анализ таблицы 1 показывает, что отечественная микропроцессорная техника прошла значительный путь по копированию зарубежных решений. Но вместе с тем заметно технологическое отставание от ведущих мировых производителей по таким параметрам, как техпроцесс производства, уровень интеграции и зрелость программной экосистемы.

*Таблица 1*

Сравнение отечественных микропроцессоров и зарубежных аналогов

| Характеристика | КР580 ВМ80А (СССР) | Intel 8080A | МЦСТ R-150 | Intel Pentium III | Baikal-T1 | Intel Atom C2358 | MIK32 Амур | STM32 L0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Год разработки | 1977 | 1974 | 2001 | 1999 | 2015 | 2013 | 2021 | 2014 |
| Архитектура | 8-bit CISC | 8-bit CISC | SPARC | x86 | MIPS32 | x86-64 | RISC-V | ARM Cortex-M0+ |
| Тактовая частота | 2.5 МГц | 2 МГц | 150 МГц | 450–1000 МГц | 1.2 ГГц | 1.7 ГГц | 32 МГц | 32 МГц |
| Техпроцесс | 6 мкм | 6 мкм | 350 нм | 250–180 нм | 28 нм | 22 нм | 180 нм | 90 нм |
| Память/кэш | внешняя | внешняя | L2 | L2 | L2 1 МБ | L2 1 МБ | SRAM/EEPROM | SRAM/Flash |

**Основные проблемы импортозамещения**

Несмотря на активное развитие отечественной электронной промышленности, создание конкурентноспособной продукции требует развитой производственной и научной инфраструктуры, а также наличия собственной архитектуры и схемотехнических решений.

Как видно из рис. 1, наибольший уровень рисков связан с производственными ограничениями, санкционным давлением и зрелостью программной экосистемы.

Одной из главных проблем является ограниченность технологических возможностей. По данным BusinesStat, с 2021 по 2025 годы объем выпуска процессоров и контроллеров в России снизился с 10,3 млн до 7,5 млн штук [2]. Большая часть выпускаемой продукции производится по устаревшим техпроцессам 65-90 нм по сравнению с зарубежными исполнителями (28 нм и ниже). Одним из решений может являться создание единой госкорпорации с объемом инвестиций около 1 трлн. рублей до 2030 года для создания производства полного цикла. Также необходимо параллельное развитие производства собственного оборудования для техпроцессов ниже 65 нм.

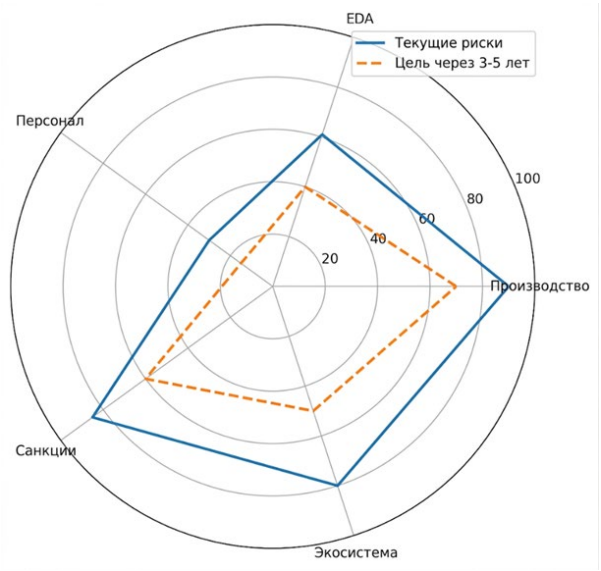



*Рис. 4.* Сравнительная оценка ключевых рисков импортозамещения микропроцессорной отрасли в текущий момент и целевые показатели на перспективу 3-5 лет

После ухода западных компаний, таких как Siemens, Cadence и Keysight, в российском ПО образовалось около 65 направлений, где отсутствуют отечественные аналоги [3]. Согласно данным Минпромторга, по состоянию на 2025 год 61% предприятий все еще используют иностранные решения в сегменте CAE-систем [4]. Создание национальных центров компетенций поможет в решении данной проблемы. Также возможна международная кооперация, например с Китаем, по созданию комплексных систем автоматизированного проектирования взамен западных.

Нехватка квалифицированных кадров признается на государственном уровне, например, в 2025 году дефицит кадров в области микроэлектроники составил 5,3 тыс. человек [5]. Главный упор надо направить на взаимодействие между ВУЗами и бизнесом для подготовки людей с нужными компетенциями. При этом необходима поддержка государства по созданию программ профобразования и переподготовки кадров.

Санкции ограничили поставки не только готовой продукции, а еще и оборудования, материалов и компонентов. Так, например, TSMC отказалась сотрудничать с российскими компаниями, что привело к остановке выпуска передовых чипов. Но легализованный механизм параллельного импорта поможет сохранить доступ к части зарубежной электроники и компонентов. Дополнительным направлением является развитие сотрудничества с китайскими и тайваньскими компаниями, которые готовы сотрудничать, несмотря на санкции. Долгосрочное решение проблемы связано с созданием собственных производственных цепочек.

Российские процессоры и микроконтроллеры не могут напрямую конкурировать с продукцией Intel, AMD, STMicroelectronics и других производителей. Так отечественных процессоров на архитектуре x86 попросту нет, а чипы на других архитектурах не могут конкурировать с ними по

производительности [6]. Процессоры, такие как Baikal, оказались дороже аналогов от Intel и AMD, что также тормозит их внедрение в коммерческом секторе. Даже если российские продукты не уступают в производительности иностранным решениям, то потенциальные заказчики все равно предпочитают покупать готовые решения с развитой программной экосистемой, которые не требуют дополнительных усилий и ресурсов для внедрения и адаптации. Для решения данной проблемы нужно стандартизировать программное обеспечение и аппаратную часть для создания единых стандартов их интеграции.

**Заключение**

В ходе проведенного исследования были рассмотрены основные этапы развития отечественной микропроцессорной техники, начиная с советских разработок, заканчивая современными решениями. Проведенный анализ показал, что процесс импортозамещения имеет ряд серьезных технологических, производственных, программных и кадровых ограничений. Были определены основные направления дальнейшего развития, и реализация данных направлений позволит укрепить технологическую независимость страны.

**Библиографический список**

1. Алишов Н. И. и др. Глава 2.2. Элементная база отечественных персональных ЭВМ // Справочник по персональным ЭВМ: справочное издание / под. ред. Б. Н. Малиновского. – Киев: Тэхника, 1990. – С. 13. – 383 с. – ISBN 5-335-00168-2.

2. Производство процессоров и контроллеров в России падает: объем производства в 2025 году составил 7,5 млн штук [Электронный ресурс]. – URL: https://ru-bezh.ru/kompanii-i-ryinki/news/26/01/21/proizvodstvo-protsessorov-i-kontrollerov-v-rossii-padaet-obem-pr (дата обращения: 04.05.2026).

3. После бегства иностранцев в российском ПО для микроэлектроники осталось 65 «белых пятен» [Электронный ресурс]. – URL: https://importfree.cnews.ru/news/top/2024-10-17_posle_uhoda_inostrantsev (дата обращения: 04.05.2026).

4. Цифровой прототип для аналоговой проблемы [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/8271583 (дата обращения: 04.05.2026).

5. В 2025 году российской микроэлектронике не хватало больше 5 тысяч человек. Какие профессии самые дефицитные? [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cnews.ru/news/top/2026-02-04_v_2025_godu_rossijskoj_mikroelektronike (дата обращения: 04.05.2026).

6. В России почти полностью остановились поставки процессоров Intel и AMD. Импортозамещение тут не поможет – российских аналогов не существует. Опрос [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cnews.ru/news/top/2025-05-22_v_rossii_pochti_polnostyu (дата обращения: 04.05.2026).

© Антропов Р.И., Важов Д.И., 2026

УДК 681.5

А.С. АРЕФЬЕВ, Р.Р. МУСЛИМОВ
*TugaKid@yandex.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Т.В. МИРИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

*Аннотация.* В работе представлен анализ современных датчиков контроля загрязнения воздуха для обеспечения безопасных условий при выполнении технических работ в бытовых и полупрофессиональных мастерских. Рассмотрены основные типы загрязнителей, возникающих при 3D-печати, пайке, работе с эпоксидными смолами и лакокрасочными материалами: мелкодисперсные и ультрамелкие частицы, летучие органические соединения, диоксид азота, канифольные аэрозоли, смоляные испарения и изоцианаты. Выполнено сравнение оптических, металлоксидных, электрохимических, фотоионизационных и комбинированных сенсорных решений. Показана возможность интеграции доступных датчиков в системы мониторинга на базе ESP32, ESPHome и Home Assistant. Определены практические ограничения применяемых датчиков и предложена рациональная конфигурация системы контроля качества воздуха для мастерской.

*Ключевые слова:* загрязнение воздуха, датчики качества воздуха, PM2.5, ультрамелкие частицы, летучие органические соединения, диоксид азота, ESP32, ESPHome, Home Assistant, мониторинг воздуха.

## Введение

В бытовых мастерских, где используются 3D-принтеры, паяльные станции, эпоксидные смолы и лакокрасочные материалы, формируется сложный спектр загрязнителей воздуха. Это ультрамелкие частицы (UFP), летучие органические соединения (ЛОС), диоксид азота, специфические аэрозоли (канифоль, смоляные испарения) и, в отдельных случаях, изоцианаты.

Исследования Stephens et al. (2013) показали: скорость эмиссии UFP при FDM-печати ABS-пластиком достигает $\approx 2\times10^{11}$ частиц/мин – уровень, сопоставимый с приготовлением пищи на газовой плите. Azimi et al. (2016) установили, что в замкнутом помещении объёмом 45 м³ концентрация стирола от одного 3D-принтера может превысить фоновое значение в 20 раз. Проблема усугубляется тем, что традиционные бытовые датчики $CO_2$ не регистрируют ни один из этих загрязнителей.

Поэтому цель нашей работы – систематизировать доступные сенсорные решения для семи типов загрязнителей, оценить их реальные технические

характеристики (по технической документации производителей) и определить пригодность для интеграции в системы на базе Home Assistant, ESPHome и микроконтроллеров ESP32.

**Классификация датчиков по принципам работы**

Современные датчики качества воздуха для бытового и полупрофессионального применения используют пять основных физических принципов:

1. Оптические лазерные датчики (Sensirion SPS30, Plantower PMS5003, SDS011) – регистрируют рассеяние лазерного излучения на частицах от 0,3 мкм.

2. Полупроводниковые металлоксидные (MOX) датчики (Sensirion SGP30/40/41, Bosch BME680/688) – измеряют изменение сопротивления чувствительного слоя при адсорбции газов.

3. Электрохимические датчики (Alphasense NO2-B43F, SPEC Sensors 3SP_NO2_5F) – генерируют ток, пропорциональный концентрации целевого газа.

4. Фотоионизационные (PID) детекторы (Ion Science MiniPID 2) – ионизируют молекулы ЛОС УФ-излучением и измеряют ионный ток.

5. NDIR (недисперсионные ИК) датчики – применяются для $CO_2$, что выходит за рамки данного обзора.

**От принципов – к мониторингу: что реально измерять**

Выше перечислены физические методы. Однако для инженера или хоббиста ключевой вопрос звучит иначе: какой датчик реально способен зафиксировать конкретную угрозу в мастерской? Например, ультрамелкие частицы (UFP) не видны обычным PM2.5-сенсорам, а изоцианаты от полиуретановых смол не детектируются ни одним MOX-датчиком за разумную цену. Поэтому далее мы последовательно разбираем каждую группу загрязнителей и для каждой – возможные технические решения.

**Мониторинг мелкодисперсных частиц PM2.5**

Sensirion SPS30 – наиболее технически совершенный оптический датчик в своём классе. Работает на длине волны 660 нм, измеряет массовую концентрацию PM1,0 / PM2,5 / PM4 / PM10 в диапазоне 0–1000 мкг/м³ с погрешностью ±5 мкг/м³ + 5% (до 100 мкг/м³). Время отклика (t90) – 8 с. Интерфейсы: I²C и UART. Питание 5 В, ток 55 мА. Ресурс – более 10 лет. Габариты 41×41×12 мм. В ESPHome поддерживается компонентом sps30.

Plantower PMS5003 – самый популярный датчик в DIY-сообществе. Диапазон 0–500 мкг/м³, погрешность ±10 мкг/м³ или ±10%. Только UART (9600 бод). Ресурс ≥3 лет. Нативная поддержка в ESPHome (pmsx003). Исследование Kuula et al. (2020) выявило слабое разделение фракций PM1 / PM2,5 / PM10.

Nova Fitness SDS011 измеряет PM2,5 и PM10 (0–999,9 мкг/м³). Ограничение по влажности – максимум 70% RH. Ресурс лазера – 8000 часов. Поддержка ESPHome (sds011).

**Ультрамелкие частицы (UFP): фундаментальный разрыв**

Основная проблема: частицы размером <100 нм (UFP) обладают высокой проникающей способностью в лёгкие и кровоток, но обычные оптические датчики (0,3 мкм и выше) их просто не видят.

Единственное компромиссное решение в доступном ценовом сегменте – Piera Systems IPS-7100. Это оптический датчик с фирменным алгоритмом подсчёта фотонов (PCIC), выдающий 7 размерных бинов: PM0,1 / PM0,3 / PM0,5 / PM1,0 / PM2,5 / PM5 / PM10. Интерфейсы – UART и I²C, питание 5 В, совместимость с 3,3-вольтовой логикой ESP32. Датчик калиброван по эталонному прибору GRIMM 11-D, имеет встроенную функцию детектирования дыма и паров (VSD). Ресурс – более 8 лет. В ESPHome нативного компонента нет – требуется написание custom component или использование MQTT-моста через Arduino-прошивку (примеры кода опубликованы Piera на GitHub).

Для количественных измерений UFP существуют референсные приборы (например, Naneos Partector 2), но их стоимость на порядок выше, что делает их неприменимыми в любительских проектах.

**Датчики летучих органических соединений (ЛОС)**

Sensirion SGP41 – оптимальный выбор для бытового мониторинга. Двухканальный MOX-датчик, выдаёт VOC Index (0–500) и NOx Index (1–500) через I²C. Потребление 3–4,6 мА при 1,8 В. ESPHome: sgp4x. Важное замечание: выход – относительный индекс, а не абсолютная концентрация в ppb.

Bosch BME680 / BME688 объединяют в корпусе 3×3×0,93 мм датчики температуры (±1°C), влажности (±3%), давления (±1 гПа) и газа. BME688 поддерживает программируемые температурные профили и обучение на целевые газы через BME AI-Studio. ESPHome: bme680_bsec.

ENS160 — цифровой MOX-датчик качества воздуха, предназначенный для мониторинга летучих органических соединений (TVOC) 0 – 65,000 ppb, эквивалентной концентрации $CO_2$ ($eCO_2$) 400 – 65,000(ppm) и оценки индекса качества воздуха (AQI). Датчик использует интерфейс I²C, отличается низким энергопотреблением и ориентирован на применение в системах контроля микроклимата и «умного дома».

Для количественного определения ЛОС в ppb применимы PID-датчики. Ion Science MiniPID 2 (10,6 эВ) обеспечивает предел обнаружения 20 ppb, t90 < 8 с. PID неселективен: измеряет суммарную концентрацию всех ЛОС с энергией ионизации ниже 10,6 эВ.

**Мониторинг диоксида азота ($NO_2$)**

SPEC Sensors 3SP_NO2_5F – электрохимический датчик. Диапазон 0–5 ppm, предел обнаружения <20 ppb, t90 <15 с, потребление 10–50 мкВт. Модуль DGS с UART подключается напрямую к ESP32. Срок службы >5 лет.

Alphasense NO2-B43F – четырёхэлектродный промышленный датчик. Чувствительность 200–650 нА/ppm. Требует платы ISB и 16-битного АЦП.

Sensirion SEN55 – мультисенсорный модуль (PM1/2,5/4/10, VOC Index, NOx Index, T, RH) в едином корпусе с I²C. ESPHome: sen5x. Канал NOx выдаёт относительный индекс (1–500), а не концентрацию в ppm.

**Проблемные зоны: изоцианаты, канифольный аэрозоль, смоляные испарения**

Изоцианаты (ПДК 5 ppb TWA по ACGIH) – наиболее сложный случай. Ни один доступный электронный датчик не обеспечивает детектирование на требуемом уровне за приемлемую стоимость. PID-датчики имеют недостаточную селективность при концентрациях в единицы ppb, MOX-датчики непригодны. Наиболее доступное решение – колориметрические бейджи (пассивные дозиметры).

Канифольный аэрозоль при пайке – смесь частиц и летучих продуктов пиролиза. Специализированных бытовых датчиков не существует. Практический подход – комбинация PM2,5 + VOC: модуль SEN55 объединяет оба канала и является оптимальным решением.

Смоляные испарения от эпоксидных смол содержат бисфенол А, эпихлоргидрин, формальдегид. MOX-датчики (SGP41, BME688) фиксируют общее повышение ЛОС, но не идентифицируют конкретные соединения. PID MiniPID 2 даёт количественное измерение, но его цена ограничивает применение.

*Таблица*

Сравнительная таблица рекомендуемых датчиков

| Загрязнитель | Датчик | Принцип | Диапазон | Интерфейс | ESPHome |
|---|---|---|---|---|---|
| PM2.5 | Sensirion SPS30 | Оптический | 0–1000 мкг/м³ | I²C, UART | sps30 |
| PM2.5 | Plantower PMS5003 | Оптический | 0–500 мкг/м³ | UART | pmsx003 |
| PM2.5 | Nova SDS011 | Оптический | 0–999,9 мкг/м³ | UART | sds011 |
| UFP (индикация) | Piera IPS-7100 | Оптический + PCIC | PM0,1…PM10 | UART, I²C | custom |
| VOC (индекс) | Sensirion SGP41 | MOX | Index 0–500 | I²C | sgp4x |

| Загрязнитель | Датчик | Принцип | Диапазон | Интерфейс | ESPHome |
|---|---|---|---|---|---|
| VOC + T/H/P | Bosch BME688 | MOX | IAQ 0–500 | I²C, SPI | bme680_bsec |
| VOC (ppb) | Ion Science MiniPID 2 | PID (10,6 эВ) | от 20 ppb | аналоговый | custom |
| $NO_2$ (ppm) | SPEC 3SP_NO2_5F | Электрохимический | 0–5 ppm | UART | custom |
| $NO_2$ (индекс) | Sensirion SEN55 | MOX + оптический | Index 1–500 | I²C | sen5x |
| Изоцианаты | Колориметрический бейдж | Пассивная диффузия | ≈5 ppb·ч | визуальный | нет |
| Канифоль | SEN55 (PM+VOC) | Комбинированный | см. выше | I²C | sen5x |

**Заключение**

Проведённый анализ позволяет сделать три ключевых вывода.

Во-первых, для большинства бытовых загрязнителей (PM2,5, ЛОС, $NO_2$) уже существуют доступные сенсорные решения с нативной интеграцией в ESPHome и Home Assistant. Особого внимания заслуживает модуль Sensirion SEN55 – единственное устройство, объединяющее пять измерительных каналов (PM1, PM2,5, PM4, PM10, VOC, NOx, температура, влажность) по цене, сопоставимой с двумя отдельными датчиками.

Во-вторых, для ультрамелких частиц (PM0,1) существует компромиссное решение Piera IPS-7100, пригодное для качественной индикации и раннего обнаружения дыма/паров. Однако для количественных измерений UFP технологический разрыв до референсных приборов остаётся на уровне двух порядков по стоимости. Для изоцианатов доступных электронных решений на уровне ПДК по-прежнему не существует.

В-третьих, все MOX-датчики принципиально неселективны: они реагируют на широкий спектр летучих соединений. Это означает, что повышение индекса VOC сигнализирует о факте загрязнения, но не идентифицирует конкретное вещество.

Для типовой мастерской (3D-печать, пайка, эпоксидные смолы) реалистичная конфигурация на базе ESP32 включает:

– SEN55 – основной модуль (PM, VOC, NOx, T, RH),

– PMS5003 – резервный канал PM2,5 (для верификации или раздельного анализа),

– Home Assistant + ESPHome – автоматическое включение вытяжки при превышении порогов.

Перспективные направления – применение машинного обучения для массивов МОХ-датчиков (точность классификации >99% для отдельных газов) и миниатюризация МЭМС-газовых сенсоров.

**Библиографический список**


1. Stephens B., Azimi P., El Orch Z., Ramos T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers // Atmospheric Environment. 2013. Vol. 79. P. 334–339. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.050.

2. Azimi P., Zhao D., Pouzet C., Crain N. E., Stephens B. Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50, № 3. P. 1260–1268. DOI: 10.1021/acs.est.5b04983.

3. Kuula J., Mäkelä T., Aurela M., Teinilä K., Varjonen S., González Ó., Timonen H. Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. Vol. 13. P. 2413–2423. DOI: 10.5194/amt-13-2413-2020.

4. Sensirion. Официальные страницы датчиков SPS30, SGP30, SGP41 и SEN55 [Электронный ресурс]. URL: https://sensirion.com/products/catalog/SPS30; https://sensirion.com/products/catalog/SGP30; https://sensirion.com/products/catalog/SGP41; https://sensirion.com/products/catalog/SEN55 (дата обращения: 12.05.2026).

5. Plantower Technology. PMS5003 – Laser PM2.5 Sensor [Электронный ресурс]. URL: https://www.plantower.com/en/products_33/74.html (дата обращения: 12.05.2026).

6. NovaSensor. SDS011 Dust Sensor [Электронный ресурс]. URL: https://en.novasensor.cn/?list_16/55.html= (дата обращения: 12.05.2026).

7. Bosch Sensortec. Официальные страницы газовых датчиков BME680 и BME688 [Электронный ресурс]. URL: https://www.bosch-sensortec.com/en/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/; https://www.bosch-sensortec.com/en/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme688/ (дата обращения: 12.05.2026).

8. Piera Systems. IPS-7100 Intelligent Particle Sensor [Электронный ресурс]. URL: https://pierasystems.com/product/piera-7100-intelligent-particle-sensor/ (дата обращения: 12.05.2026).

9. ION Science. MiniPID 2 Sensor Guide [Электронный ресурс]. URL: https://ionscience.com/wp-content/uploads/2021/02/Sensor-Product-guide.pdf (дата обращения: 12.05.2026).

10. SPEC Sensors. 3SP_NO2_5F P Package 110-507 [Электронный ресурс]. URL: https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/10/3SP_NO2_5F-P-Package-110-507.pdf (дата обращения: 12.05.2026).

11. Alphasense. Nitrogen Dioxide sensor NO2-B43F [Электронный ресурс]. URL: https://store.alphasense.com/no2-b43f/ (дата обращения: 12.05.2026).

12. naneos. Partector 2 – multimetric nanoparticle detector [Электронный ресурс]. URL: https://www.naneos.ch/partector2.html (дата обращения: 12.05.2026).

© Арефьев А.С., Муслимов Р.Р.,2026

УДК 681.586.787

И.Ф. БАТЫРШИН
*batyrshin.9797gizzatullin@ya.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.А. МУХАМАДИЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТРАНСФОРМАТОРА В СРЕДЕ SIMINTECH

*Аннотация*. В статье рассматривается подход к созданию динамической имитационной модели синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ) в среде SimInTech. Модель базируется на системе дифференциальных уравнений электрической машины в обобщенных координатах (dq). Приводятся результаты моделирования токов статора при различных значениях угла поворота ротора.

*Ключевые слова*: вращающийся трансформатор, математическая модель, имитационная модель, уравнения Горева-Парка, синусно-косинусный трансформатор, SimInTech.

В процессе изучения характеристик существующих СКВТ (а именно СКТ- 265Д8) появилась необходимость создания динамической модели работы СКВТ в одной из сред моделирования. Для моделирования выбрана среда SimInTech, обладающая обширным количеством функциональных блоков и позволяющая моделировать довольно сложные физические процессы.

**Идеализированная модель ВТ**

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) в общем случае представляются, как трансформаторы, в которых выходной сигнал трансформатора меняется по строго определенному закону в зависимости от угла поворота ротора. Согласно книге [1] информация о текущем угле задается в амплитуде выходных сигналов датчика. Уравнение для СКВТ, аналитически записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} U_{sin}(t) = \sin(\alpha) * U\text{вх} * \sin(2 * \pi * f * t); \\ U_{cos}(t) = \cos(\alpha) * U\text{вх} * \sin(2 * \pi * f * t); \end{cases}$$

Приведенные аналитические зависимости описывают идеальную функциональную зависимость выходов СКВТ от угла поворота. Однако процессы и физические явления происходящие при работе ВТ представляется сложной системой уравнений учитывающие индуктивности, токи в обмотках и

другие параметры. Далее рассмотрено как получить систему дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ВТ.

**Уравнения Горева-Парка**

В книге [2] предложено теоретическое описание и универсальная математическая модель электрической машины. Основное уравнение для исследования и описания процессов в электрических машинах это уравнения Горева-Парка. Система уравнений описывает взаимодействие ротора и статора электрической машины в координатах dq. Данная система уравнений подходит для описания любого типа электрической машины с некоторыми допущениями и уточнениями. Эти уравнения описывают падение напряжения на обмотках статора и ротора по осям d и q. Ниже приведена система уравнений Горева-Парка в классической форме:

$$\begin{cases} u_{ds} = \mathrm{p} * \psi_{ds} - \omega * \psi_{qs} + \mathrm{R}_s * i_{ds}; \\ u_{qs} = \mathrm{p} * \psi_{qs} + \omega * \psi_{ds} + \mathrm{R}_s * i_{qs}; \\ u_{dr} = \mathrm{p} * \psi_{dr} + \mathrm{R}_r * i_{dr}; \\ u_{qr} = \mathrm{p} * \psi_{qr} + \mathrm{R}_r * i_{qr}; \end{cases}$$

где $p = \frac{d}{dt}$ - оператор дифференцирования, $u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ – напряжения статора и ротора по осям (d и q), $\psi_{ds}, \psi_{qs}$ – полные потокосцепления статора по осям (d и q), $\psi_{dr}, \psi_{qr}$ – полные потокосцепления ротора по осям (d и q), ω – угловая частота вращения ротора (в рад/с), $\mathrm{R}_s$– активное сопротивление статора, $\mathrm{R}_r$ – активное сопротивление ротора.

Для реализации модели в среде динамического моделирования классическую систему уравнений Горева-Парка приведем к форме Коши (разрешим относительно производных токов). Это позволит сформировать структурную схему на базе стандартных блоков интегрирования, обеспечив учет взаимных магнитных связей через коэффициенты связи. Путем подстановки выражений для магнитных потоков в уравнения напряжений и решения полученной системы относительно производных токов, была получена расчетная форма модели:

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{Lr}{\Delta} * \left(u_{ds} - \mathrm{R}_s * i_{ds} + \omega * \psi_{qs}\right) - \frac{M}{\Delta} * \left(u_{dr} - \mathrm{R}_r * i_{dr} + \omega * \psi_{qr}\right); \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{Ls}{\Delta} * \left(u_{qs} - \mathrm{R}_s * i_{qs} - \omega * \psi_{ds}\right) - \frac{M}{\Delta} * \left(u_{qr} - \mathrm{R}_r * i_{qr} - \omega * \psi_{dr}\right); \\ \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{Lr}{\Delta} * \left(u_{dr} - \mathrm{R}_r * i_{dr} + \omega * \psi_{qr}\right) - \frac{M}{\Delta} * \left(u_{ds} - \mathrm{R}_s * i_{ds} + \omega * \psi_{qs}\right); \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{Lr}{\Delta} * \left(u_{qr} - \mathrm{R}_r * i_{qr} - \omega * \psi_{dr}\right) - \frac{M}{\Delta} * \left(u_{qs} - \mathrm{R}_s * i_{qs} - \omega * \psi_{ds}\right); \end{cases}$$

где $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ – токи статора и ротора по осям (d и q), $\frac{di_{ds}}{dt}, \frac{di_{qs}}{dt}, \frac{di_{dr}}{dt}, \frac{di_{qr}}{dt}$ – производные токов статора и ротора по осям (d и q), $\psi_{ds}, \psi_{qs}$ – полные потокосцепления статора по осям (d и q), $\psi_{dr}, \psi_{qr}$ – полные

потокосцепления ротора по осям (d и q), ω – угловая частота вращения ротора (в рад/с), $R_s, Ls$ – активное сопротивление и индуктивность статора, $R_r, Lr$ – активное сопротивление и индуктивность ротора, M – взаимная индуктивность между статором и ротором, $\Delta$ – определитель системы. Определитель системы выражается по формуле:

$$\Delta = Ls * Lr - M^2.$$

Потокосцепления рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = \text{Ls} * i_{ds} + \text{M} * i_{dr}; \\ \psi_{qs} = \text{Ls} * i_{qs} + \text{M} * i_{qr}; \\ \psi_{dr} = \text{Lr} * i_{dr} + \text{M} * i_{ds}; \\ \psi_{qr} = \text{Lr} * i_{qr} + \text{M} * i_{qs}. \end{cases}$$

Полученная система дифференциальных уравнений являться ядром модели СКВТ и может быть реализована в среде SimInTech.

**Создание модели в среде SimInTech**

Опираясь на руководство по моделированию электропривода в среде SimInTech [3] создадим модель общего вида решающая полученную систему дифференциальных уравнений.

Коэффициенты усиления (перед слагаемыми в уравнениях) в системе уравнений являются расчетными и зависят от паспортных характеристик СКВТ. Это показывает универсальность модели - в нее можно прописать характеристики другого реального СКВТ (либо задать при проектировании нового).

Определимся с константами $Ls, Lr, Rs, Rr, M$ и $\Delta$ которые для каждого СКВТ определяются его геометрией, количеством витков в обмотке и т.д. Значения для реализованной модели взяты из паспортных параметров СКВТ СКТ-265Д8. Согласно паспортным данным на СКТ-265Д8: $Z_{01} = 800$ Ом, $K = 0.22, f_{\text{в}} = 400$ Гц.

По данным значениям вычисляем $Ls, Lr, Rs, Rr, M$ и $\Delta$:

$$Lr = \frac{Z_{01}}{2 * \pi * f_{\text{в}}} = \frac{800}{2513} = 0.318 \text{ Гн};$$

$$M = K * Lr = 0{,}22 * 0{,}318 = 0.07 \text{ Гн};$$

$$Ls = \frac{M^2}{Lr * (1 - \sigma)} = \frac{0{,}07^2}{0{,}318 * 0{,}95} = 0.016 \text{ Гн};$$

$$\Delta = Ls * Lr - M^2 = 0{,}318 * 0{,}016 - 0{,}07^2 = 0{,}000188 \text{ Гн};$$

$$Rr = 0{,}15 * Z_{01} = 0{,}15 * 800 = 120 \text{ Ом};$$

$$Rs = Rr * K^2 = 120 * 0{,}22^2 = 6 \text{ Ом}.$$

Модель построена по принципу структурной схемы. В основе лежат 4 блока интегрирования, охваченные перекрестными обратными связями. При построении модели применены стандартные блоки сумматоров, умножителей, усилителей и интеграторов.

На вход модели подается напряжение возбуждения с действующим значением 36 В и с частотой 400 Гц, а также угол поворота ротора.

Параметры решателя, выбранные в настройках проекта: шаг $\Delta t = 10^{-6}$ сек, метод интегрирования: Эйлера.

На рис. 1 представлена модель, решающая данную систему уравнений относительно токов.

На рис. 2 показаны графики токов статора по координатам d и q (в модели i_ds и i_qs) в зависимости от угла поворота ротора. По ним четко видно амплитудную модуляцию напряжения возбуждения по законам косинуса и синуса угла. Для более наглядного представления изменения тока в выходных обмотках ВТ угол поворота ротора монотонно возрастающая функция от 0 до $2\pi$.

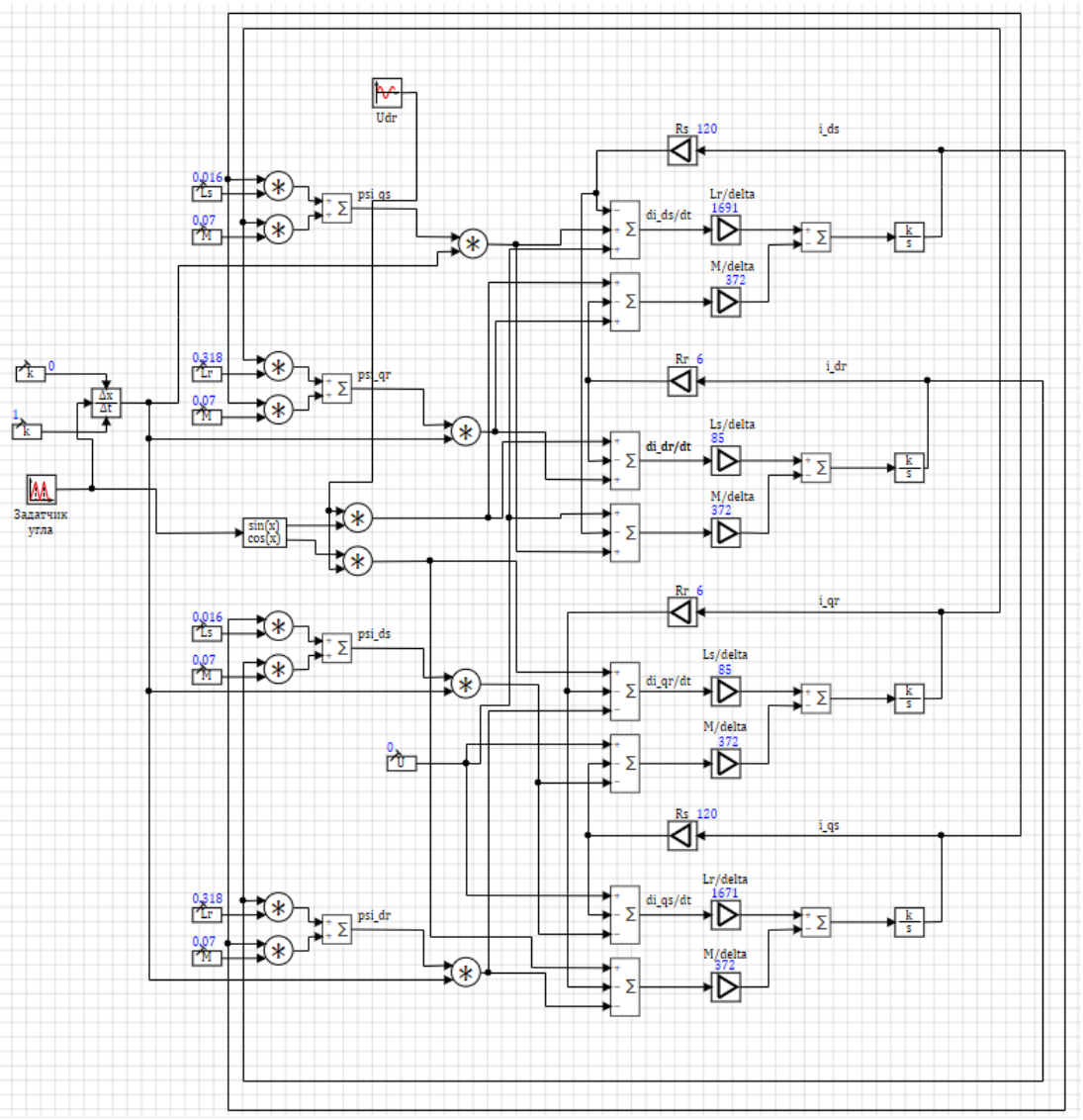



*Рис 1.* Полная система уравнений в среде SimInTech

Можно отметить следующие преимущества в реализованной модели:

1. Высокая физическая точность. В отличие от простых тригонометрических моделей, в разработанной модели учитывается инерционность (индуктивность), фазовые сдвиги и «реакция якоря» (взаимное влияние обмоток).

2. Универсальность. Модель легко перестроить под любой другой датчик (изменив коэффициенты в уравнении) или использовать для моделирования поломок (внося асимметрию в коэффициенты).

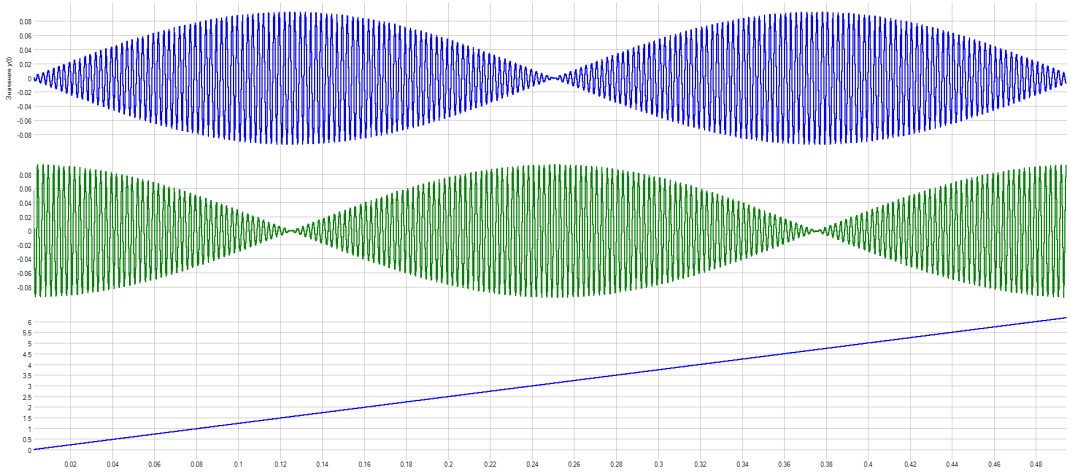


*Рис 2.* Полученные значения токов по осям d и q и при изменении угла от 0 до 2π

Однако от недостатков данная модель также не лишена. Выделим основные недостатки построенной модели ВТ:

1. Высокая вычислительная сложность. Из-за «жесткости» системы уравнений приходится использовать очень малый шаг интегрирования ($\Delta t = 10^{-6}$с), что замедляет расчет длинных процессов.

2. Сложность настройки (чувствительность). Малейшая ошибка в одном из четырех каналов или знаке обратной связи приводит к неустойчивости модели.

3. Идеализация магнитного контура. В данной реализации не учитываются нелинейные эффекты, такие как насыщение стали и потери на гистерезис.

**Выводы**

Приведенная в статье модель ВТ позволяет учитывать процессы происходящие в нем. При необходимости исследования различных типов воздействий на ВТ данная модель может быть уточнена и расширена. Модель, приведенная в данной статье, может быть использована для моделирования работы любой электрической машины. Ядро модели при использовании уравнений Горева-Парка остается постоянной.

**Библиографический список**

1. Баканов М. В. Информационные микромашины следящих и счетно-решающих систем (вращающиеся трансформаторы, сельсины) / М. В. Баканов, В. А. Лыска, В. В. Алексеев. – М.: Энергия, 1974. – 183 с.

2. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов – 2-изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 368 с., ил.

3. Калачёв Ю. Н. SimInTech – моделирование в электроприводе : учебное пособие / Ю. Н. Калачёв. – Москва: ДМК Пресс, 2021. – 156 с. – ISBN 978-5-97060-934-7.

© Батыршин И.Ф., 2026

УДК 004.738.2

Г.И. БОБРОВ
*jedyKyle@yandex.com*
Науч. руководов. – ст. преп. Е.Ф. НУРЛЫГАЯНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## БЛОК АВТОНОМНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ LoRa

*Аннотация*. В статье представлены актуальность, структурная схема устройства автономной сенсорной сети с возможным принципом работы.

*Ключевые слова*: LoRa, LoRaWAN, программное обеспечение, передача данных, микроконтроллеры, Bluetooth, Wi-Fi, интернет вещей, smart sensor network.

В нынешнюю эпоху быстрого развития и широкого распространения концепции «умных» систем, системы беспроводных устройств с большой дальностью связи и крайне низким энергопотреблением обладают большой значимостью во многих сферах жизни: от водопроводных счетчиков с дистанционным считыванием показаний до специализированных устройств на трубопроводах нефтегазовой отрасли. Что же представляют из себя такие сети и как может выглядеть типовой блок такой системы? Рассмотрим данный вопрос подробнее.

**Автономная сенсорная сеть**

Автономная сенсорная сеть (англ. «Smart Sensor Network») – это интеллектуальная сеть, в которой каждый из распределенных узлов выполняют помимо измерений параметров среды локальную обработку данных, обмениваются информацией и могут частично принимать решения по выполнению некоторых действий. В отличие от обычных систем измерения, такая «умная» сеть за счет объединения функций анализа, наблюдения и передачи данных в единую структуру способна работать в изменяющихся условиях, сохранять устойчивость при отказе отдельных элементов и узлов.

Каждое устройство имеет средства измерения, обработки и автономное питание. Использование собственных алгоритмов позволяет устройству работать без непрерывного централизованного управления: узлы поддерживают работоспособность сети за счет самостоятельного прокладывания маршрутов при изменении ее топологии.

Благодаря этому такие системы востребованы в труднодоступных и удаленных объектах, где нет возможности частой настройки и обслуживания элементов сети.

Для связи в таких системах частым выбором является LoRa (Long Range) – это энергоэффективная технология связи большой дальности, рассчитанная на передачу малых объемов данных при низком энергопотреблении и высоком уровне помех и шумов. По сравнению с Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi и другими решениями для малых расстояний, LoRa потребляет гораздо меньше энергии при большем радиусе действия. Однако, для универсальности, удобства настройки и возможности выхода в Интернет производители электронных компонентов выпускают модули, сочетающие LoRa, BLE, Wi-Fi, что позволяет нивелировать недостатки и использовать все преимущества данных протоколов связи.

**Состав блока автономной сенсорной сети**

Разработка блока автономной сенсорной сети, как и любого устройства, начинается с определения состава выполняемых им функций. В состав такого устройства входят датчики для регистрации параметров окружающей среды, радиопередатчик, вычислительный модуль и система питания. Рассмотрим возможные варианты для каждого узла устройства.

Датчики для регистрации параметров окружающей среды могут быть самыми различными и считывать такие показатели как: относительную влажность, температуру воздуха или температуру определенного тела в необходимой точке, барометрическое давление, вибрацию, ускорение и т.д.

Помимо того, что эти показатели можно измерять как внутри корпуса блока (для отслеживания состояния устройства), так и снаружи (измерение внешней среды, показаний и состояния приборов). Все это многообразие параметров, способов и конкретных реализаций измерений позволяет крайне гибко подходить к вопросу разработки измерительной части.

Так как основными требованиями к устройствам автономной сенсорной сети является крайне низкое энергопотребление и длительная работа без обслуживания, необходимо уделить много внимания схеме питания устройства. Идеальным решением будет использовать перезаряжаемые аккумуляторные батареи вместе со схемой использования «естественной» энергии. Такими источниками может послужить световая, тепловая энергии как наиболее эффективные. Также возможно использование первичных аккумуляторов крайне высокой емкости, но придется учитывать ряд недостатков такого выбора. Наиболее дальновидным решением будет оставить возможность настроить устройство на один из режимов работы: работа от аккумулятора с подзарядкой, работа с первичным аккумулятором без подзарядки, работа напрямую от стабильного источника энергии.

Так как в настоящее время есть множество различных решений для построения вычислительного модуля, следует тщательно выбрать наиболее подходящий вариант. Например, выбрать микроконтроллер со встроенным радиоблоком для уменьшения размеров платы, либо же использовать связку

микроконтроллер и приемопередатчик для уменьшения стоимости. Наиболее гибким решением будет использовать модуль радиопередатчика, совмещающий различные протоколы связи, управляемый микроконтроллером.

**Реализация блока автономной сенсорной сети**

Приведем пример реализации узла автономной сенсорной сети для измерения базовых показателей окружающей среды. Структурная схема такого блока изображена на рисРис. *1.* Схема электрическая структурная возможной реализации блока

автономной сенсорной сети, представленном ниже.

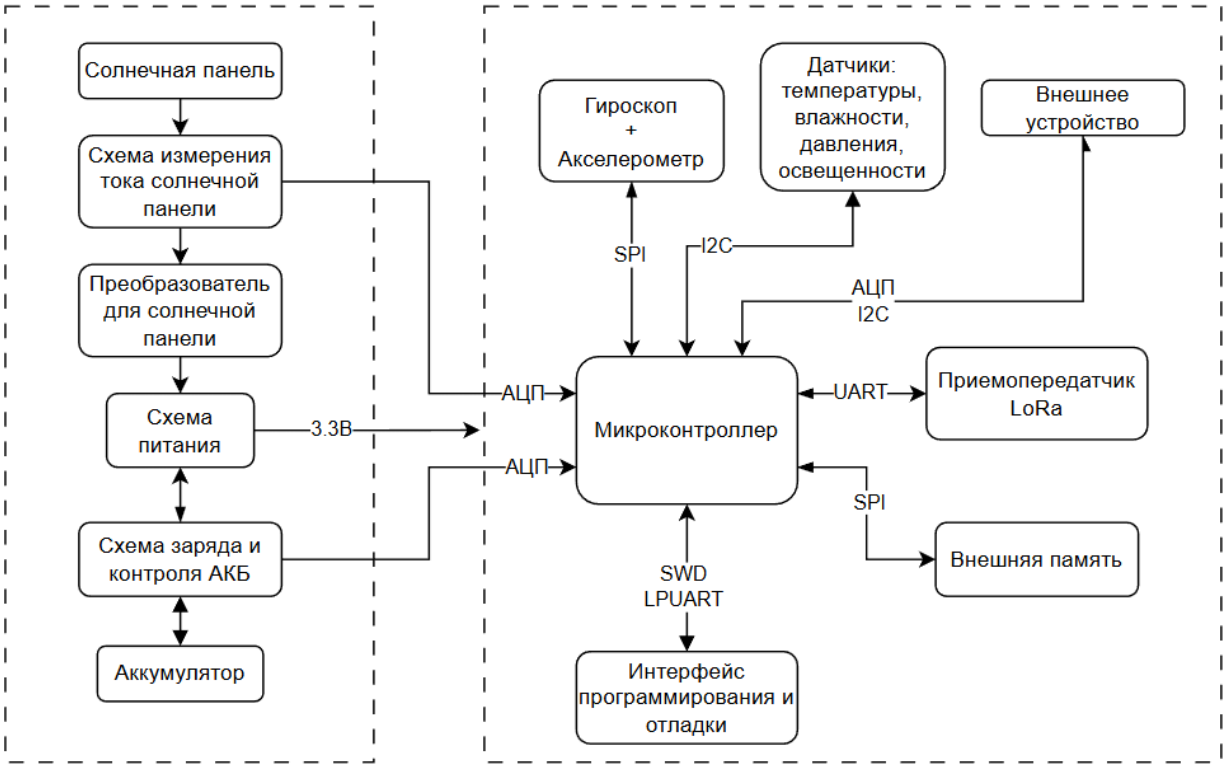



*Рис. 1.* Схема электрическая структурная возможной реализации блока автономной сенсорной сети

Структура устройства включает ранее рассмотренные функциональные блоки, дополненные подсистемой автономного питания и сервисными интерфейсами. В качестве источника энергии применяется перезаряжаемый литий-ионный аккумулятор с возможностью подзарядки от солнечной панели. Для согласования режима работы фотоэлектрического источника с нагрузкой предусматривается DC-DC преобразователь с алгоритмом отслеживания точки максимальной мощности (MPPT), что позволяет более эффективно использовать энергию панели при пониженной и крайне низкой освещённости, например в сумерках или в облачную погоду. Контроль параметров заряда аккумулятора и тока, вырабатываемого солнечной панелью, позволяет

динамически изменять режимы передачи данных и энергосбережения в зависимости от текущего запаса энергии, повышая устойчивость и предсказуемость работы устройства.

В качестве сенсорной части используются датчики температуры, влажности и атмосферного давления, а также 6-осевой инерциальный модуль (три оси для акселерометра и гироскопа). Дополнительно предусмотрено подключение внешнего датчика освещённости, а также возможность расширения системы за счёт цифровых устройств, подключаемых по шине I2C, или аналоговых источников сигнала. Такая конфигурация позволяет адаптировать узел под различные задачи мониторинга без существенного изменения базовой архитектуры.

В состав блока также входит внешняя память, предназначенная для хранения измеренных данных, журналов событий и служебной информации. Радиомодуль реализует передачу данных по каналу LoRa, а также может поддерживать дополнительные беспроводные интерфейсы, включая BLE и Wi-Fi. Для упрощения настройки, диагностики и сервисного обслуживания предусмотрен интерфейс командной строки (Command Line Interface), позволяющий получать данные о состоянии устройства, изменять параметры работы и выполнять первичную проверку функций системы.

В качестве вычислительного ядра используется микроконтроллер, сочетающий продвинутые режимы энергосбережения с достаточной производительностью для обработки данных и управления периферией. Его работа организуется таким образом, чтобы активное время за счет высокой вычислительной мощности было минимальным, а основную часть цикла устройство проводило в режиме пониженного потребления. Это позволяет существенно снизить среднее энергопотребление и обеспечить длительную автономную эксплуатацию блока без дополнительного обслуживания.

**Применимые алгоритмы обработки данных**

В качестве примера обработки данных можно рассмотреть алгоритм анализа сигналов акселерометра и гироскопа, применяемый для вибродиагностики устройства, обнаружения удара и определения изменения его положения.

Для решения подобных задач используются стандартные методы анализа:

1. Вычисление статических и энергетических признаков во временной области (среднее значение, среднеквадратичное значение, пик-фактор, эксцесс, коэффициент асимметрии);

2. Цифровые фильтры для выделение необходимого диапазона частот;

3. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) для оценки спектра и спектральной мощности;

4. Метод анализа огибающей;

5. Упрощенный порядковый анализ.

Для большинства перечисленных методов существует рекуррентные выражения, что позволяет обновлять параметры по мере поступления новых данных. Это позволяет снизить нагрузку на микроконтроллер и исключает

необходимость перерасчета параметров с нуля после каждого поступившего измерения. Подобный подход крайне важен для автономных устройств с низким энергопотреблением, где требуется сочетание вычислительной мощности и длительного времени работы.

Использование указанных алгоритмов позволяет получать набор диагностических признаков, повышая точность и оперативность обработки данных. На основе полученных характеристик можно определять время, частоту и интенсивность ударных воздействий, оценивать положение и перемещение устройства в пространстве, выделять типичный вибрационный паттерн и сопоставлять его с эталонным режимом работы. Это даёт возможность выявлять признаки износа и неисправностей на ранней стадии. Дополнительные датчики при этом позволяют уточнять условия, в которых возникло отклонение, что повышает информативность системы при сохранении её энергоэффективности и автономности.

Для обработки данных, получаемых от других датчиков, применяются более простые методы цифровой фильтрации, такие как арифметическое усреднение, скользящее среднее, медианный фильтр и экспоненциальное сглаживание. В узлах сенсорной сети особенно часто используют скользящее среднее, поскольку оно эффективно подавляет кратковременные выбросы и случайные помехи, что повышает устойчивость измерений и точность оценки параметров окружающей среды.

**Заключение**

В рамках данной статьи были рассмотрены основные принципы построения автономной сенсорной сети и возможные протоколы связи. Сформирована логика построения блока такой сети, включающего сенсорную часть, вычислительный модуль, радиопередатчик и систему питания, что позволяет рассматривать его как автономный законченный узел распределённой измерительной системы. Предложенная архитектура обеспечивает сочетание масштабируемости, автономности и функциональной гибкости, а также формирует основу для мониторинга состояния объектов и параметров окружающей среды в составе современной интеллектуальной сенсорной сети, в том числе в задачах промышленного применения.

## Библиографический список

1. Применение технологии LoRa для организации энергоэффективных сетей [Электронный ресурс] // CyberLeninka: [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologii-lora-dlya-organizatsii-energoeffektivnyh-setey (дата обращения: 03.05.2026).

2. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением [Электронный ресурс] // CyberLeninka : [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/model-dostavki-soobscheniya-v-sensornoy-seti-s-nizkim-energopotrebleniem (дата обращения: 03.05.2026).

3. Основные принципы разработки программного комплекса, основанного на технологии LoRa для систем Интернета вещей [Электронный ресурс] // CyberLeninka: [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-printsipy-razrabotki-programmnogo-kompleksa-osnovannogo-na-tehnologii-lora-dlya-sistem-internet-veschey (дата обращения: 03.05.2026).

4. Энергосберегающий метод управления формированием передаваемых сигналов в беспроводной сенсорной сети [Электронный ресурс] // CyberLeninka : [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/energosberegayuschiy-metod-upravleniya-formirovaniem-peredavaemyh-signalov-v-besprovodnoy-sensornoy-seti (дата обращения: 03.05.2026).

5. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи [Электронный ресурс] // CyberLeninka : [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/slezhenie-za-tochkoy-maksimalnoy-moschnosti-solnechnoy-batarei (дата обращения: 03.05.2026).

6. Методы определения точки максимальной мощности фотоэлектрической батареи [Электронный ресурс] // CyberLeninka : [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-opredeleniya-tochki-maksimalnoy-moschnosti-fotoeletricheskoy-batarei (дата обращения: 03.05.2026).

8. Оптимизация энергопотребления микроконтроллерных систем [Электронный ресурс] // Вестник Южно-Уральского государственного университета: [сайт]. – URL: https://eneff.susu.ru/publish/Energy_consumption_optimization_in_microcontroller_applications/ (дата обращения: 03.05.2026).

12. LoRaWAN [Электронный ресурс] // Википедия : [сайт]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/LoRaWAN (дата обращения: 03.05.2026).

13. MPPT [Электронный ресурс] // Википедия : [сайт]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/MPPT (дата обращения: 03.05.2026).

© Бобров Г.И., 2026

УДК 681.51

И.А. ЧЕРТОВ
*quartz1.0@mail.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. А.А. МУХАМАДИЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И СТЕРЕОЗРЕНИЯ

*Аннотация.* В статье рассматривается разработка информационно-измерительной системы (ИИС) управления беспилотной колёсной платформой

на основе искусственного интеллекта. Описана двухуровневая архитектура системы, включающая вычислительный модуль с алгоритмами компьютерного зрения и микроконтроллерное управление исполнительными механизмами.

*Ключевые слова:* беспилотная платформа, искусственный интеллект, информационно-измерительная система, стереозрение, YOLO, детекция объектов, NVIDIA Jetson, двухуровневое управление.

Современный этап развития робототехники характеризуется стремительным переходом от дистанционно управляемых аппаратов к полностью автономным системам, способным воспринимать окружающую среду и принимать решения без участия человека. Это особенно актуально для задач складской и внутренней логистики, патрулирования территорий, а также для сельскохозяйственных и коммунальных работ. Ключевым требованием к таким платформам является способность в реальном времени обрабатывать большие объемы сенсорной информации и формировать надежные управляющие воздействия. Традиционные подходы, основанные на навигации по заданной траектории без анализа препятствий, не обеспечивают должного уровня автономности и безопасности в динамически изменяющейся среде.

Ответом на эти вызовы является создание информационно-измерительных систем, глубоко интегрирующих методы искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Данная статья посвящена разработке такой системы для беспилотной колесной платформы, способной в автономном режиме детектировать препятствия, определять их трехмерные координаты и формировать команды управления для их объезда.

Структурная схема разработанной информационно-измерительной системы представлена на рис. 1.

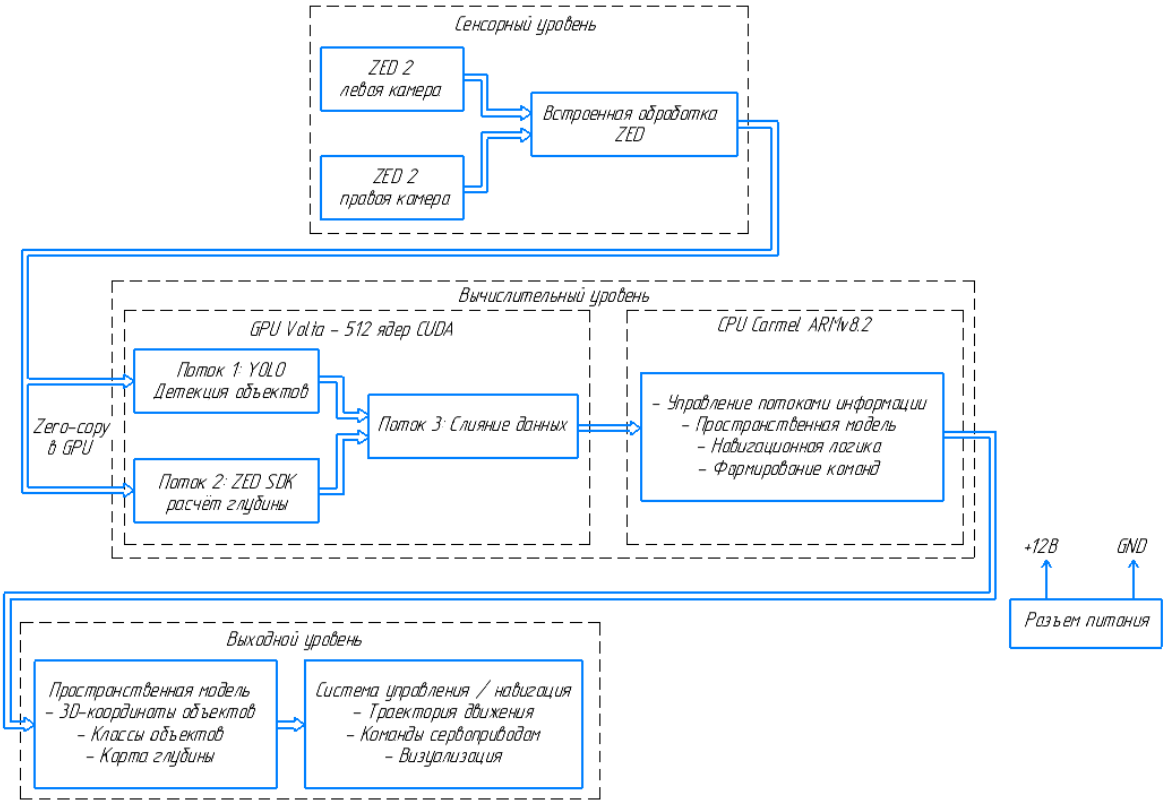



*Рис. 1.* Структурная схема информационно-измерительной системы

Функционально система разделена на три уровня: сенсорный, вычислительный и исполнительный. Каждый уровень решает собственный круг задач, а информационные потоки между ними образуют сквозной конвейер обработки данных – от восприятия окружающей среды до управляющего воздействия на моторы.

Сенсорный уровень реализован на базе пассивной стереокамеры ZED 2 [1]. В отличие от активных сенсоров, таких как лидары, камера не излучает сигнал, а работает по принципу человеческого зрения. Два объектива, разнесённых на фиксированное расстояние, захватывают левый и правый видеопотоки. Анализируя смещение (диспаратность) объектов на этих изображениях, камера вычисляет расстояние до каждой точки сцены. Результатом работы сенсорного уровня является плотное облако точек — массив трёхмерных координат, описывающий всё видимое пространство перед платформой. Такой подход позволяет получить детальную пространственную картину без использования дорогостоящего и энергоёмкого оборудования.

Вычислительный уровень построен на модуле NVIDIA Jetson Xavier AGX [2]. Этот компактный компьютер объединяет 8-ядерный процессор Carmel ARMv8.2 и графический ускоритель Volta с 512 ядрами CUDA и 64 тензорными ядрами.

Ключевое преимущество платформы заключается в поддержке архитектуры параллельных вычислений CUDA, благодаря которой несколько ресурсоёмких задач искусственного интеллекта выполняются одновременно. На GPU параллельно работают три вычислительных потока. Первый поток

обрабатывает левое изображение нейросетью YOLO, детектируя объекты и определяя их классы [3]. Второй поток через ZED SDK вычисляет карту глубины и строит облако точек. Третий поток выполняет слияние результатов: каждому обнаруженному объекту присваиваются его трёхмерные координаты из облака точек. Таким образом, платформа не просто фиксирует наличие препятствия, но и точно знает его положение в пространстве. После завершения обработки на CPU формируются высокоуровневые команды управления, которые через USB-интерфейс направляются на следующий уровень.

Исполнительный уровень реализован на микроконтроллере STM32F103C8T6 [4], к которому подключены рулевой сервопривод и регулятор хода двигателя. Прямое подключение сервоприводов к Jetson невозможно, поскольку операционная система Linux не является системой реального времени и не гарантирует требуемой точности временных интервалов. Задержки, свойственные многозадачной среде, могут привести к дрожанию сервоприводов и некорректной отработке команд. Микроконтроллер, напротив, работая на тактовой частоте 72 МГц и используя аппаратные модули ШИМ, формирует стабильные управляющие импульсы с точностью до микросекунд. Получив от Jetson высокоуровневую команду, он преобразует её в конкретные значения ширины импульса для рулевого сервопривода и регулятора скорости, обеспечивая плавное и предсказуемое движение платформы.

Таким образом, система сочетает трёхуровневую функциональную архитектуру с двухуровневой логикой управления: верхний уровень (сенсорный и вычислительный) отвечает за восприятие среды и принятие решений, нижний (исполнительный) – за их точную аппаратную реализацию. Дополнительно предусмотрена возможность беспроводного подключения через Wi-Fi адаптер, что позволяет осуществлять удалённый мониторинг состояния платформы в режиме реального времени.

Практическим результатом работы стал действующий прототип беспилотной колёсной платформы. В ходе испытаний подтверждена способность системы распознавать препятствия, определять их трёхмерные координаты и формировать управляющие команды для автономного движения. Питание системы организовано по двухконтурной схеме с гальванической развязкой, что исключает взаимное влияние помех между вычислительной и силовой частями. Разработанное решение может применяться в образовательных и исследовательских целях, а также служить основой для создания более сложных автономных транспортных средств.

## Библиографический список

1. Stereolabs. ZED 2 – AI Stereo Camera Specifications [Электронный ресурс] / Stereolabs. – Режим доступа: https://www.stereolabs.com (дата обращения: 20.04.2026).

2. NVIDIA Corporation. Jetson Xavier AGX Module Datasheet / NVIDIA Corporation. – Режим доступа: https://developer.nvidia.com/embedded/downloads (дата обращения: 20.04.2026).

3. Redmon, J. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – P. 779–788.

4. STMicroelectronics. STM32F103C8T6 Datasheet – 32-bit MCU with 64 KB Flash / STMicroelectronics. – Режим доступа: https://www.st.com (дата обращения: 20.04.2026).

© Чертов И.А., 2026

УДК 681.7.01

Т.З. ДЕЛОВЕРОВ
*deloverov.timur.03@mail.ru*
Науч. руководов. д-р техн. наук, проф. В.Х. ЯСОВЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ТОРЦОМ ОПТОВОЛОКНА И ФОТОПРИЁМНИКОМ В ДАТЧИКЕ ЗАЗОРА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Аннотация.* В статье рассматривается расчёт коэффициента оптической связи между торцом оптоволокна и светочувствительной площадкой фотодиода в волоконно-оптическом датчике зазора лопаток газотурбинного двигателя. Построена геометрическая модель распространения излучения и получено аналитическое выражение для коэффициента преобразования оптического сигнала.

*Ключевые слова:* волоконно-оптический датчик, коэффициент оптической связи, газотурбинный двигатель, измерение зазора, фотодиод, оптическое излучение, геометрическая модель.

### Введение

Контроль радиального зазора лопаток газотурбинного двигателя является важной задачей, влияющей на эффективность его работы. В условиях высоких температур и вибраций применяются бесконтактные методы измерения, в частности волоконно-оптические датчики. Эффективность таких систем определяется коэффициентом оптической связи между торцом оптоволокна и фотодиодом, зависящим от геометрии и параметров элементов. В работе рассматривается расчёт данного коэффициента на основе геометрической модели распространения излучения.

**Расчёт коэффициента передачи**

Для определения коэффициента оптической связи между торцом оптоволокна и светочувствительной площадкой фотодиода, по которому передаётся отражённое от торца лопаток излучение, можно принять ряд допущений:

1. Поток на выходе оптоволокна равномерно распределён в конусе его апертуры.

2. Распределение потока на выходе приёмного канала подчиняется закону Ламберта, то есть яркость, идеально рассеивающей свет поверхности, одинакова во всех направлениях [1].

На рис. 1 в позиции 1, в плоскости ab изображён торец оптоволокна радиусом $R_в$, расположенный на расстоянии $h_{пл}$ от плоскости cd светочувствительной площадки фотодиода на позиции 2. Выходной поток оптоволокна представлен в виде потока от мнимого точечного источника, расположенного в точке О. Весь этот поток заключён в конусе, определяемый апертурным углом волокон $\varphi_m$. Отношение потока Р, попадающего на светочувствительную площадку фотодиода, к полному потоку $P_{полн}$, излучаемому из оптоволокна, определим как отношение объёма шарового сегмента АВС к части этого объёма, заключённой в цилиндрической поверхности DEGF [2].

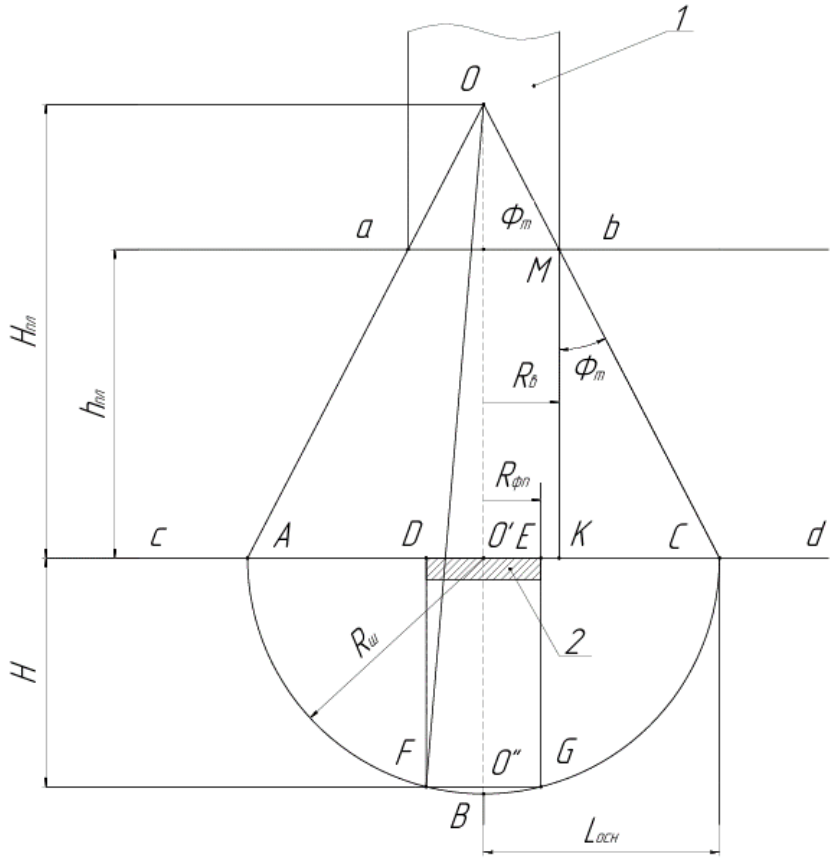



*Рис. 1.* Геометрическая модель распространения излучения

Объём шарового сегмента ABC:

$$V_1=\pi(R_ш-H_{пл})(\frac{L_{осн}^2}{2}+\frac{(R_ш-H_{пл})^2}{6}),$$

где $R_ш$ - радиус шарового сегмента, $H_{пл}$ - расстояние от центра шара до плоскости cd, $L_{осн}$ – радиус окружности, лежащей в основании шарового сегмента.

Объём фигуры, ограниченный шаровым сегментом ABC и цилиндрической поверхностью DEGF:

$$V_2=\pi R_{фп}^2 H+\pi(R_ш-H_{пл}-H)\left(\frac{R_{фд}^2}{2}+\frac{(R_ш-H_{пл}-H)^2}{6}\right),$$

где $R_{фп}$ – радиус светочувствительной площадки.

Из треугольников OO′C и OO″G определим:

$$L_{осн}=R_ш \sin\varphi_m;$$

$$H_{пл}=R_ш \cos\varphi_m;$$

$$H_{пл}+H=\sqrt{R_ш^2-R_{фд}^2}.$$

Учитывая формулы выше, составим отношение:

$$\frac{P}{P_{полн}}=\frac{V_2}{V_1}=\frac{R_ш\left(R_ш^2-1{,}5R_в^2\cos\varphi_m\right)-\sqrt{R_ш^2-R_{фд}^2}(R_ш-1{,}5R_в^2+0{,}5R_{фд}^2)}{R_ш^3(0{,}5\,(\cos\varphi_m)^3-1{,}5\cos\varphi_m+1)},$$

где радиус шара определяется из подобных треугольников OO′C и MKC:

$$R_ш=\frac{R_в+h_{пл}\tan\varphi_m}{\sin\varphi_m}.$$

Так как в фотодиодах светочувствительная площадка 2 может иметь различную форму, определяемую технологией изготовления, в паспорте на фотодиод приводится значение её площади $S_{фд}$ [3]. С учётом того, что минимальное расстояние от торца оптоволокна до светочувствительной площадки, определяемое корпусным исполнением фотодиода, превышает размеры этой площадки, можно записать:

$$R_{фд}=\sqrt{\frac{S_{фд}}{\pi}}.$$

Коэффициент оптической связи оптоволокно-фотоприёмник:

$$K=\frac{P}{P_{полн}}T_{зап}T_в;$$

$$K=\frac{(\sin\varphi_m)^2\left(\frac{R}{\sqrt{2}}+h_{пл}\tan\varphi_m\right)\cdot\left(\sqrt{\frac{\left(2^{-\frac{1}{2}}R+h_{пл}\tan\varphi_m\right)^2}{(\sin\varphi_m)^2}}-\frac{3}{4}R^2\cos\varphi_m\right)}{\left(\frac{R}{\sqrt{2}}+h_{пл}\tan\varphi_m\right)^3(0{,}5(\cos\varphi_m)^3-1{,}5\cos\varphi_m+1)}-$$

$$-\frac{(\sin\varphi_m)^3\left(\sqrt{\frac{\left(2^{-\frac{1}{2}}R+h_{пл}\tan\varphi_m\right)^2 S_{фд}}{(\sin\varphi_m)^2\pi}}\right)\left(\frac{\left(2^{-\frac{1}{2}}R+h_{пл}\tan\varphi_m\right)^2 3R^2}{(\sin\varphi_m)^2 4}+\frac{S_{фд}}{\pi}\right)}{\left(\frac{R}{\sqrt{2}}+h_{пл}\tan\varphi_m\right)^3(0{,}5(\cos\varphi_m)^3-1{,}5\cos\varphi_m+1)}\cdot T_{зап}T_в,$$

где $T_{зап}$ – коэффициент заполнения площади торца жилами оптоволокна, $T_в$ – коэффициент пропускания одной жилы оптоволокна, при прямом падении лучей на торец [4].

**Заключение**

Полученные выражения позволяют определить коэффициент оптической связи между торцом оптоволокна и фотоприёмником, а также могут быть использованы при проектировании и оптимизации оптоволоконных измерительных систем.

## Библиографический список


1. Зак Е.А. Волоконно-оптические датчики. – М.: Радио и связь, 1990. – 192 с.

2. Бадеева Е.А. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом. – М.: МГУЛ, 2004. – С. 68–70, 181–186.

3. Минеев А.В., Ясовеев В.Х. Аналитическая модель измерительного оптико-электронного зонда малых аксиальных перемещений // Автометрия. 2021. – Т. 57.– №1. – С. 80–91.

4. Деловеров Т.З., Ясовеев В.Х. Расчёт коэффициента передачи волоконно-оптического датчика зазора лопаток газотурбинного двигателя // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2026. - № 17. – С. 231-233.


© Деловеров Т.З., 2026

УДК 621.396.9

Д.А. ГАЙСИН
*gaisindawid@yandex.ru*
Науч. руководитель – док. техн. наук, проф. В.С. ФЕТИСОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# АНАЛИЗ РЫНКА UWB-МОДУЛЕЙ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ НАВИГАЦИИ БПЛА

*Аннотация*. Статье рассматривается применение технологии сверхширокополосной связи (UWB) для навигации беспилотных летательных аппаратов как перспективной альтернативы спутниковым системам позиционирования (GPS/ГЛОНАСС), демонстрирующим недостаточную точность и стабильность в сложных условиях. Проведён анализ текущего состояния и тенденций развития рынка UWB-модулей: оценены объёмы и темпы роста.

*Ключевые слова*: UWB; БПЛА; навигация БПЛА; высокоточное позиционирование; трилатерация; промышленная автоматизация.

## Введение

В условиях развития цифровых технологий и автоматизации процессов особую актуальность приобретает задача высокоточного позиционирования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Традиционные спутниковые навигационные системы (GPS/ГЛОНАСС) не всегда обеспечивают необходимую точность и стабильность сигнала, особенно в условиях городской застройки, промышленных объектов или закрытых помещений [11, 12]. В качестве перспективного решения данной проблемы выступает технология сверхширокополосной связи (Ultra-Wideband, UWB), позволяющая определять местоположение с сантиметровой точностью [1, 8].

## Анализ рынка UWB-модулей

Рынок UWB-модулей демонстрирует устойчивый рост. По данным на 2025 год, его объём оценивается в $1,8 млрд, а к 2034 году прогнозируется увеличение до $7,2 млрд при среднегодовом темпе роста 16,7 % [3, 6]. Ключевыми факторами, стимулирующими развитие рынка, являются:

– растущий спрос на услуги высокоточного позиционирования в реальном времени;

– развитие автомобильной промышленности (бесключевой доступ, системы предотвращения столкновений);

– расширение экосистемы интернета вещей (IoT) и умных устройств;

– внедрение UWB в смартфоны и потребительскую электронику;

– рост потребностей промышленной автоматизации и логистики [4, 7].

Среди основных сегментов рынка выделяют [6]:

1. электронные компоненты (сетевые приемопередатчики, антенны, системы управления питанием, микроконтроллеры), где доминирует сегмент сетевых приемопередатчиков (38,4 % в 2025 году);

2. приложения (автомобильная промышленность, потребительская электроника, здравоохранение, аэрокосмическая отрасль и оборонная сфера);

3. частотные диапазоны (ниже 6 ГГц, 6–9 ГГц, выше 9 ГГц);

4. конечных пользователей (OEM-производители, постпродажный рынок).

Ключевыми производителями на рынке являются NXP Semiconductors, Infineon, Continental, Bosch, Qorvo, Apple, Samsung и другие компании [4, 5, 7].

Основные тенденции развития включают [3, 5]:

1. существенное уменьшение размеров модулей;

2. интеграцию UWB с другими беспроводными протоколами (например, NFC) в однокристальных решениях;

3. расширение применения в промышленной автоматизации;

4. совершенствование стандартов и регуляций, снижающих затраты на сертификацию.

**Принципы работы UWB в навигации БПЛА**

Технология UWB основана на передаче сверхкоротких импульсов наносекундной длительности в широкой полосе частот (от 3,1 до 10,6 ГГц) согласно стандарту IEEE 802.15.4a/z [1]. Ширина полосы пропускания сигнала превышает 500 МГц или 20% от центральной частоты, что обеспечивает высокую точность позиционирования и устойчивость к помехам [2].

Для навигации БПЛА система использует наземные UWB-анкеры (базовые станции) и мобильные метки, размещённые на борту аппарата. Определение положения осуществляется методами измерения времени пролёта сигнала (Time of Flight, ToF), включая [9, 10]:

1. Two-Way Ranging (TWR) – двунаправленное измерение расстояния;

2. Time of Arrival (ToA) – измерение времени прихода сигнала;

3. Time Difference of Arrival (TDoA) – измерение разности времени прихода.

На основе полученных данных выполняется трилатерация – вычисление пространственных координат БПЛА в реальном времени [8]. При использовании двух меток на борту дополнительно может определяться курс аппарата [14].

Бортовой вычислительный модуль обрабатывает данные позиционирования, выполняет алгоритмы фильтрации и преобразования координат, а также взаимодействует с полётным контроллером для корректировки траектории движения [13,15].

**Преимущества UWB для навигации БПЛА**

1. высокая точность позиционирования (до нескольких сантиметров), критичная для задач точной посадки и маневрирования в ограниченном пространстве [8,10];

2. устойчивость к многолучевому распространению сигнала благодаря широкой полосе пропускания [2];

3. способность работать в условиях отсутствия прямой видимости (NLOS), так как сигнал может проникать сквозь некоторые материалы (стекло, бетон, дерево) [1, 9];

4. низкое энергопотребление по сравнению с другими беспроводными технологиями (например, Wi-Fi и Bluetooth Low Energy) [4, 5];

5. возможность интеграции с инерциальными измерительными устройствами (IMU) и магнитометрами для повышения точности [10, 14];

6. криптографическая защита данных (стандарт IEEE 802.15.4z с использованием Scrambled Timestamp Sequence, STS), обеспечивающая устойчивость к спуфингу и подмене пакетов [1];

7. низкая задержка передачи данных, необходимая для оперативного управления БПЛА [8].

**Ограничения и проблемы**

Несмотря на значительные преимущества, применение UWB для навигации БПЛА сопряжено с рядом ограничений [2, 5, 9]:

1. ограниченная дальность действия (обычно до 100 м), что требует развёртывания плотной сети анкеров для покрытия больших территорий;

2. необходимость прямой видимости между БПЛА и базовыми станциями для достижения максимальной точности;

3. высокие требования к синхронизации между анкерами и метками, что усложняет настройку системы;

4. чувствительность к внешним помехам и экранированию сигнала в сложных условиях (например, в городской застройке);

5. необходимость размещения нескольких анкеров (минимум трёх для 2D-позиционирования и четырёх для 3D) для устойчивой работы системы.

**Сферы применения и перспективы**

Системы навигации на базе UWB находят применение в следующих областях [3, 4, 6]:

– логистика и автоматизированная доставка (точное позиционирование БПЛА при доставке грузов);

– промышленная инфраструктура (мониторинг оборудования, инспекция объектов);

– сельское хозяйство (картографирование, мониторинг посевов);

– поисково-спасательные операции (навигация в условиях ограниченной видимости);

– строительство и геодезия (создание 3D-моделей объектов).

Перспективы развития связаны с совершенствованием стандартов UWB, снижением стоимости компонентов и расширением частотных диапазонов [1, 5, 10]. Это позволит масштабировать системы для работы на больших площадках (например, размером 100×100 м и более) при развёртывании соответствующей наземной инфраструктуры.

**Заключение**

Технология UWB представляет собой перспективное решение для высокоточной навигации БПЛА, особенно в условиях, где традиционные спутниковые системы неэффективны [8, 11]. Несмотря на существующие ограничения, её преимущества – сантиметровая точность, устойчивость к помехам и возможность интеграции с другими датчиками – делают её востребованной в различных отраслях [2, 9, 10]. Дальнейшее развитие стандартов, снижение стоимости компонентов и оптимизация алгоритмов обработки данных будут способствовать более широкому внедрению UWB в системах управления беспилотными летательными аппаратами [1, 5, 15].

**Библиографический список**

1. IEEE Standard for Low‑Rate Wireless Networks (IEEE 802.15.4‑2020), включая разделы по UWB (a/z). – IEEE, 2020. – URL: (дата обращения: 03.05.2026).

2. Galitsyn, A. C‑UWB RF Technology for Military Applications: Resilience and Security Features // Modern Electronics. – 2020. – № 9. – P. 45–52.

3. Market Research Future. Ultra‑Wideband (UWB) Market – Global Forecast to 2034. – 2025. – 120 p.

4. NXP Semiconductors. UWB Technology Whitepaper: Principles and Applications in IoT and Navigation. – Eindhoven : NXP, 2024. – 32 p.

5. Qorvo. UWB Positioning Solutions for Industrial and Commercial Use Cases. – Technical Report TR‑2024‑01. – 2024. – 48 p.

6. Research and Markets. Global Ultra‑Wideband (UWB) Module Market Outlook 2025–2034: Trends, Segments, and Key Players. – Dublin : Research and Markets, 2025. – 156 p.

7. Samsung Electronics. UWB in Mobile Devices: Integration and Performance Analysis. – Seoul : Samsung, 2023. – 64 p.

8. Smith, J., Brown, L. Precision Navigation of UAVs Using UWB: Experimental Validation in Urban Environments // Journal of Navigation. – 2023. – Vol. 76, No. 4. – P. 512–528.

9. Wang, H., Li, Y., Zhang, Q. TDoA and TWR Algorithms for UWB‑Based Positioning: Comparative Study // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022. – Vol. 21, No. 8. – P. 6015–6027.

10. Zhang, R., Chen, W. Integrated IMU and UWB Navigation System for Indoor UAVs // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 12. – Art. 5432. – DOI: 10.3390/s23125432.

11. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография / К. М. Антонович ; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – Москва : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.

12. Зинченко, О. Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъёмки для картографирования. – Москва : Ракурс, 2011. – 12 с.

13. Милашин, Д. Е. Система ориентации и навигации беспилотного летательного аппарата самолётной схемы // X Международная студенческая научная конференция «Студенческий научный форум». – Томск : ТПУ, 2018. – URL: (дата обращения: 03.05.2026).

14. Распопов, В. Я. Решение задачи ориентации для беспилотных летательных аппаратов / В. Я. Распопов, А. П. Шведов // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 2(73). – С. 27–36.

15. Самарова, Г. Г. Управление полётом малоразмерных беспилотных летательных аппаратов без использования информации об углах крена и тангажа: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – Казань: КФУ, 2016. – 183 с.

© Гайсин Д.А., 2026

УДК 621.396.9

И.Н. ГИБАЕВ
*waata97@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.Л. ТИМОФЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА В СИЛОВОМ КОНТРОЛЛЕРЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕЛЕМЕТРИИ БПЛА

*Аннотация.* В статье проанализированы основные ошибки измерения тока в регуляторах скорости БПЛА (шум ШИМ, дрейф шунта, синфазные помехи). Предложены цифровые, аппаратные, аппаратно-цифровые методы, позволяющие снизить погрешность с типичных 5-10 % до 1-2 %. Экспериментально подтверждено, что точность можно повысить без замены аппаратной части электронного регулятора скорости.

*Ключевые слова*: беспилотный летательный аппарат, электронный регулятор скорости, измерение тока, ШИМ.

**Введение**

Беспилотные летательные аппараты развиваются с каждым днем и вместе с этим возрастают стандарты и требования к техническим характеристикам и точности телеметрии. Один из важнейших параметров бортовой телеметрии является ток, потребляемый беспилотным судном.

В большинстве современных БПЛА установлены электронные регуляторы скорости без анализа потребляемого тока, что усложняет калибровку и измерение запасного хода воздушного судна. Все электронные устройства имеют потери тока. Особенно это заметно с силовыми элементами.

В среднем электронные регуляторы скорости, которые имеют широкое применение среди пользователей, имеют погрешность измеряемого тока в 5-10 %. При полетном токе 20-30 А это соответствует ошибке в 1-3 А. За 10 минут полета при таких показателях приводит к ошибке оценки остатка заряда в 15-25%.

Целью данной работы является анализ существующих источников погрешности измерения тока в силовом контроллере дрона и предложить комплексное решение для повышения точности измерения [1, 2].

**Методы измерения тока в электронном регуляторе скорости**

Самым распространенным методом для измерения тока является использование шунтирующего резистора. Ток протекает через шунт, падение напряжения после усиливается с помощью дифференциального усилителя. Далее выходной аналоговый сигнал обрабатывается микроконтроллером. На сегодняшний день существуют специальные устройства – токовый шунтирующий монитор. Это устройства является компактным и более точным аналогом и содержит в себе шунт и усилитель для подобных целей. Достоинства: низкая стоимость, высокая линейность и простота реализации. Недостатки: тепловые потери, температурный дрейф сопротивления.

Альтернативой прошлого метода является датчик Холла. Ток создает магнитное поле, пропорционально которому формируется напряжение на выходе датчика. Метод обеспечивает гальваническую развязку и отсутствуют потери мощности. Стоимость больше, линейность хуже.

В современных БПЛА применяются чаще всего шунт, так как является более дешевым и компактным в отличии от датчика с эффектом Холла.

**Источники погрешностей**

В настоящее время существует несколько основных параметров, влияющих на погрешность измерения тока.

ШИМ-сигнал является основным источником погрешности из-за его шумов. В регулятор скорости приходит ШИМ-сигнал от полетного контроллера прямо в драйвер для управления MOSFET-транзисторами. При данной коммутации возникают импульсные выбросы напряжения и накладываются с сигналом шунта. Частота ШИМ-сигнала создает помехи в широком спектре.

Температурный дрейф. При нагреве шунта меняется его сопротивление в диапазоне 20% от номинала, что приводит к ошибке измерения.

Синфазные помехи. Дифференциальный усилитель при вычитании получает полезный сигнал, но чаще всего усилитель неидеален и подавляет не полностью, что приводит к появлению дополнительного искажения.

Задержка передачи телеметрии. Протоколы по типу DShot передают данные раз в 32 мс, что может не отражать быстрых изменений тока.

Кроме того, многие регуляторы скорости используют встроенный 10-битный АЦП в микроконтроллере. Это приводит к ошибке квантования.

**Методы повышения точности**

Выбор прецизионного шунта. Рекомендуется использовать шунт из таких материалов как манганин, так как он устраняет основную температурную погрешность.

Фильтровые каскады. Использование фильтров, даже самых простейших могут ослабить высокочастотные шумы. Например, RC-фильтр на входе АЦП.

В отличии от аппаратных методов, приведенных выше, цифровых методов гораздо больше. Рассмотрим их далее.

Передискритизация. Несколько измерений за один период ШИМ-сигнала вместо одного измерений. После эти измерения усредняются.

Медианный фильтр раз в несколько отсчетов удаляет аномальные значения (обычно 1 значение раз в 5-10 отсчетов).

Фильтр Калмана обеспечивает компромисс между сглаживанием и запаздыванием. Особенно полезен на быстроменяющихся токах. Не требует объемных вычислительных ресурсов микроконтроллера.

В качестве аппаратно-цифрового метода используется синхронизация измерения с ШИМ-сигналом. При помощи специальных прошивок микроконтроллера можно синхронизировать запуск АЦП с фазой ШИМ-периода.

Финальным методом корректировки регулятора скорости БПЛА является калибровка. Предлагается двухэтапная калибровка. Сначала запускается регулятор с выключенными двигателями, запоминается значение и вычисляется разница при активной составляющей. Следующий этап заключается в том, что подается ток и регулятор скорости регулирует коэффициенты, исправляя чувствительность.

Иногда устанавливают датчик температуры и вводят исправление температурной ошибки для шунта. Формула для исправления приводится в технической документации шунта.

**Экспериментальные результаты**

В качестве эксперимента используем шунт, двухэтапную калибровку, медианный фильтр и передискритизацию.

Для верификации предложенных методов был собран стенд: ESC 60A 4-в-1 на прошивке BLHeli_32 (модифицированной для синхронизации АЦП), мотор 2306 1900 кВ, аккумулятор 8S LiPo.

По осциллограмме (рис.1) видно, что после применения методов повышения точности график сгладился. Пропали резкие скачки тока до 60 А. Значения теперь колеблются в диапазоне 20-40 А, до этого выходили за эти пределы.

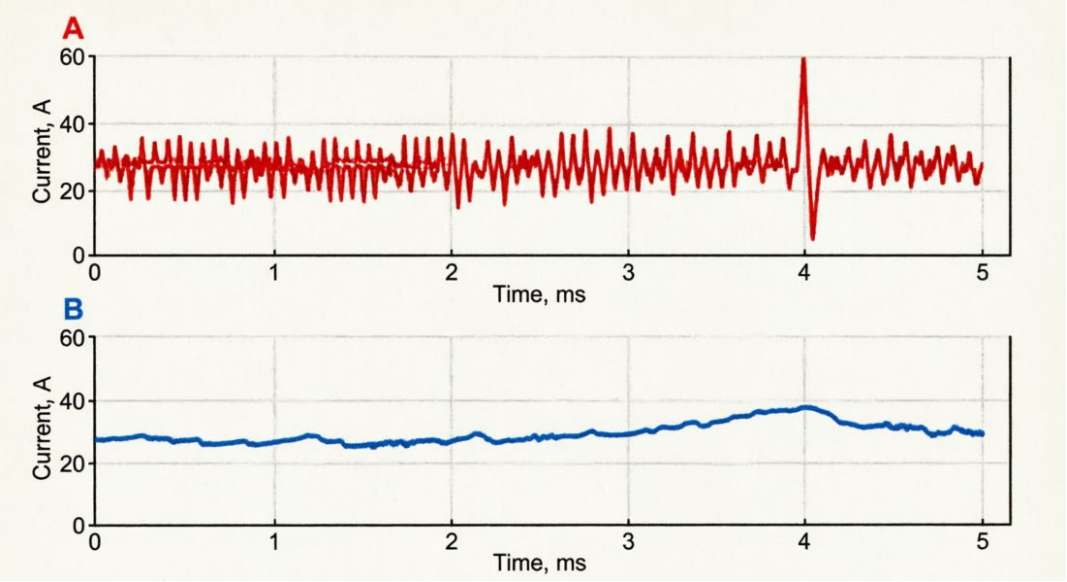



*Рис. 1.* Осциллограмма тока по времени без применения методов повышения точности (график А) и с применением (график В)

**Рекомендации**

Предложенные методы можно использовать комплексно. Это приведет к достижению уменьшения погрешности до 1-2% без замены регулятора скорости БПЛА.

Если установить RC-фильтр и провести калибровку, то погрешность уменьшится до 2-3%. Чтобы это значение достигло примерно 1% нужно добавить синхронизацию с ШИМ и температурную компенсацию, а также изменить прошивку добавив цифровые фильтры.

**Заключение**

В работе был проведен анализ погрешностей измерения тока в регуляторах скорости беспилотных летательных аппаратов. Основными источниками погрешности являются шум ШИМ-сигнала, температурный дрейф шунта и синфазные помехи. Были предложены аппаратные, цифровые и аппаратно-цифровые методы уменьшения погрешностей. Показаны осциллограммы реальных измерений тока на стенде, и уменьшена погрешность измерения с помощью комплекса методов: прецизионный шунт. Это дает возможность повысить надежность и эффективность эксплуатации БПЛА.

**Библиографический список**

1. Беспилотные летательные аппараты вертикального взлета: сборка, настройка и программирование : учебное пособие / М. А. Ковалев, Д. Н. Овакимян. – Самара : Су, 2023. – (дата обращения: 18.05.2026).
2. ГОСТ Р 59517-2021. Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация. – Москва: Стандартинформ, 2021.

© Гибаев И.Н., 2026

УДК 629.7.05

В.Г. ГУБАЙДУЛЛИН, Д.Г. ИРАЕВ
*vgubaidullin484@gmail.com*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Т.В. МИРИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА ПОЛЁТНОГО КОНТРОЛЛЕРА КАК ЭЛЕМЕНТ КОНСТРУКЦИИ БПЛА: ТРЕБОВАНИЯ К КОМПОНОВКЕ, НАДЁЖНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ

*Аннотация*. В статье рассматриваются вопросы интеграции аппаратной платформы полётного контроллера в конструкцию БПЛА. Систематизированы требования к компоновке, массогабаритным показателям и виброустойчивости бортовой электроники.

*Ключевые слова*: полетный контроллер, БПЛА, компоновка авионики, надежность, виброустойчивость, аппаратное резервирование.

## Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) предъявляют жёсткие требования к бортовым системам управления, среди которых центральное место занимает полётный контроллер. Аппаратная платформа контроллера выступает не только как вычислительное ядро, но и как конструктивный элемент, непосредственно влияющий на общую надёжность, массогабаритные характеристики, технологичность сборки и условия эксплуатации летательного аппарата. В условиях ограниченного объёма фюзеляжа, интенсивных вибраций от силовой установки и электромагнитных помех от регуляторов скорости традиционные подходы к компоновке электроники оказываются недостаточными.

Цель данной работы – систематизация требований к аппаратной платформе полётного контроллера как элементу конструкции БПЛА, анализ методов обеспечения её надёжности и виброустойчивости, а также обоснование технологичных решений для интеграции в серийные и экспериментальные образцы.

**Требования к компоновке и массогабаритным характеристикам**

Аппаратная платформа должна удовлетворять противоречивым требованиям: минимизация массы и габаритов при сохранении теплоотвода, доступности разъёмов и удобства монтажа.

В практике проектирования выделяют следующие приоритеты:

– Оптимизация площади печатной платы. Плотная компоновка компонентов снижает длину высокоскоростных линий, однако требует учёта тепловых потоков. Микроконтроллеры на подобии STM32F7 (с тактовой частотой ~200 МГц, и наличием FPU) выделяют значительную мощность в пиковых режимах, что обуславливает необходимость размещения термоплощадок, тепловых переходных отверстий или контактных площадок для крепления к радиатору/корпусу.

– Эргономика подключения. Разъёмы телеметрии, GPS, питания и исполнительных механизмов должны быть ориентированы к технологическим люкам или кабель-каналам фюзеляжа. Их расположение на периферии платы или на выносных гибких шлейфах упрощает сборку и последующее обслуживание без демонтажа всей платформы.

– Модульность или моноблок. В практике проектирования авионики БПЛА рассматриваются две основные концепции компоновки аппаратной платформы: моноблочная и модульная. Моноблочное решение предполагает размещение всех компонентов (вычислительного ядра, датчиков, цепей питания и интерфейсов) на единой печатной плате. Такой подход обеспечивает минимальную массу, снижение себестоимости производства и упрощение сборки, однако ограничивает возможности пространственного разнесения чувствительных элементов от источников вибраций и электромагнитных помех, а также затрудняет замену отдельных подсистем в процессе эксплуатации. Модульная архитектура предусматривает разделение платформы на независимые блоки, как правило, на вычислительный модуль и выносной измерительный блок. Это позволяет оптимально распределить компоненты в объёме фюзеляжа: датчики размещаются в зоне минимальных механических нагрузок (ближе к центру масс или в носовой части), а основная плата с микроконтроллером, силовыми цепями и разъёмами крепится вблизи технологических люков. Модульное исполнение повышает виброустойчивость и упрощает обслуживание, но увеличивает общую массу системы, требует дополнительных межблочных соединителей и усложняет трассировку высокоскоростных интерфейсов.

**Обеспечение надёжности и виброустойчивости в условиях эксплуатации**

Надёжность полётного контроллера определяется его способностью сохранять работоспособность при отказах отдельных компонентов, воздействиях вибраций и электромагнитных помехах. Для обеспечения надежности предлагается реализовать комплекс конструктивно-схемотехнических мер, направленных на повышение отказоустойчивости:

Инерциальные измерительные модули и барометры критически чувствительны к механическим воздействиям. Для снижения передачи высокочастотных вибраций от моторной группы и каркаса БПЛА можно использовать механическую развязку: размещение датчиков на демпфирующих опорах, физическое разнесение от силовых проводников и источников тепла.

Для обеспечения электромагнитной совместимости рекомендуется использовать одноточечное соединение «силовой» и «сигнальной» земли, что исключает протекание импульсных токов силовых цепей через аналоговые измерительные каналы. Высокоскоростные интерфейсы (SPI, I2C) следует прокладывать на внутренних слоях платы или экранировать сплошными заземляющими полигонами. Питание чувствительных аналоговых цепей необходимо формировать через выделенные малошумящие стабилизаторы

Для повышения живучести системы предлагается использовать резервирование критических узлов. Целесообразно устанавливать несколько датчиков одного типа, данные которых обрабатываются алгоритмами перекрёстной проверки. При обнаружении аномалий в показаниях одного из каналов система осуществляет переход на резервный датчик. Кроме того, рекомендуется реализовать двукратный ввод питания с автоматическим приоритетным выбором работоспособного источника, непрерывным контролем напряжения бортовой сети и аппаратной защитой от перенапряжений и переполюсовки.

**Технологичность интеграции и конструктивные решения**

Интеграция полётного контроллера в конструкцию БПЛА должна обеспечивать повторяемость сборки, ремонтопригодность и совместимость с открытыми программно-аппаратными стеками. При проектировании рекомендуется придерживаться следующих инженерных подходов:

Для упрощения интеграции с бортовым оборудованием предлагается ориентироваться на стандарты экосистемы Pixhawk. Размещение на плате нескольких портов UART, шин CAN, 8–12 PWM-выходов, а также резервных линий SPI/I2C позволяет гибко подключать GPS-модули, телеметрию, интеллектуальные регуляторы скорости и полезную нагрузку без доработки конструкции фюзеляжа. Такой подход обеспечивает нативную совместимость с открытыми программными стеками (PX4/ArduPilot) и упрощает конфигурирование платформы под различные аэродинамические схемы.

При разработке печатной платы целесообразно закладывать требования, обеспечивающие высокую технологичность изготовления и сборки. Рекомендуется минимизировать использование выводных компонентов, отдавая приоритет SMD-элементам стандартных типоразмеров. Чёткая шелкография с позиционными обозначениями, унификация высоты компонентов и отказ от ручной пайки в пользу автоматизированного монтажа снижают трудоёмкость производства и упрощают входной контроль.

Для повышения ремонтопригодности и сокращения времени подготовки к полёту предлагается размещать элементы диагностики и управления в зоне

свободного доступа оператора. Установка светодиодных индикаторов состояния, сервисных разъёмов (USB, SWD/JTAG) и кнопки калибровки/сброса на периферии платы позволяет проводить предполётную проверку, обновление прошивки и считывание полётных логов без демонтажа силовой установки или отсека полезной нагрузки.

**Заключение**

Аппаратная платформа полётного контроллера выступает ключевым конструктивным элементом БПЛА, определяющим не только вычислительные возможности, но и общую надёжность, виброустойчивость и технологичность сборки летательного аппарата. Предложенная архитектура, ориентированная на микроконтроллеры на подобии STM32F7, модульное разделение вычислительного и измерительного блоков, двукратный ввод питания, аппаратное резервирование датчиков и соблюдение правил ЭМС-трассировки, обеспечивает баланс между эксплуатационными требованиями и реализуемостью в условиях проектных работ. Ориентация на открытые стандарты (Pixhawk-совместимость, PX4/ArduPilot) снижает риски интеграции и упрощает последующую модернизацию.

**Библиографический список**

1. ГОСТ Р 56122–2014. Беспилотные авиационные системы. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 9 с.

2. Ковалёв, М. А. Беспилотные летательные аппараты вертикального взлета: сборка, настройка и программирование: учебное пособие / М. А. Ковалёв // Самара: Издательство Самарского университета – 2023.– 96 с.

© Губайдуллин В.Г., Ираев Д.Г., 2026

УДК 681.7.01

Б.А. ХАФИЗОВ
*Khafizov.bulat2015@gmail.com*
Науч. руководов. – д-р техн. наук, проф. В.Х. ЯСОВЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ

*Аннотация.* Рассматриваются методы оперативного определения состава водонефтяных эмульсий с применением оптических анализаторов. Актуальность обусловлена ростом обводненности продукции скважин и необходимостью непрерывного контроля в потоке. Описаны принципы ближней инфракрасной спектроскопии и метода обратного рассеяния света.

Проведен анализ преимуществ по сравнению с традиционными методами. Показана перспективность внедрения в автоматизированные системы добычи. Выполнен сравнительный анализ оптических, микроволновых и гибридных влагомеров, применяемых ведущими нефтесервисными компаниями.

*Ключевые слова*: водонефтяная эмульсия, обводненность, оптический анализатор, ИК-спектроскопия, рассеяние света, микроволновой метод, контроль в потоке, автоматизация добычи.

**Введение**

В процессе разработки нефтяных месторождений происходит неизбежное увеличение обводненности продукции скважин, особенно на поздних стадиях эксплуатации. Содержание воды может достигать 80–95 %, что существенно усложняет процессы транспортировки, сепарации и подготовки нефти.

Актуальность исследования заключается в необходимости получения достоверной информации о составе водонефтяной эмульсии в режиме реального времени. Это позволяет оптимизировать режимы работы скважин, снизить затраты на подготовку продукции и повысить эффективность разработки месторождений.

Целью работы является анализ методов определения состава эмульсий с использованием оптических анализаторов, а также оценка их преимуществ по сравнению с традиционными и альтернативными подходами.

Водонефтяная эмульсия представляет собой сложную полидисперсную систему, где глобулы воды распределены в углеводородной среде. Оптические методы анализа базируются на взаимодействии электромагнитного излучения с этой дисперсной структурой.

**1. Ближняя инфракрасная спектроскопия (БИК-спектроскопия)**

Наиболее проработанным и точным оптическим методом анализа продукции скважин является спектроскопия в ближней инфракрасной области (Near-Infrared, NIR). Физический принцип метода основан на том, что молекулы воды и молекулы углеводородов по-разному поглощают кванты электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от 780 до 2500 нм. Явление обусловлено специфическими колебательными переходами при воздействии излучения, где энергия квантов совпадает с энергией обертонов и комбинированных частот атомных колебний.

Вода имеет ярко выраженные пики поглощения на длинах волн около 1450 нм и 1940 нм. Данные спектральные максимумы соответствуют первому обертону валентных колебаний и комбинационным полосам связей O-H. Углеводороды (нефть и газовый конденсат) в этих узких диапазонах практически прозрачны, так как их основные полосы поглощения, связанные с колебаниями групп C-H, сосредоточены в других областях спектра. Высокая спектральная селективность позволяет точно идентифицировать водную фазу в составе сложной многокомпонентной эмульсии даже при наличии растворенных газов, мелкодисперсных взвесей и химических реагентов.

Количественная оценка концентрации фаз описывается фундаментальным законом Бугера - Ламберта - Бера [1]:

$$A=lg(\frac{I_0}{I}) = \varepsilon \cdot L \cdot c,$$

где A - оптическая плотность среды; $I_0$ - интенсивность излучения источника; I – интенсивность прошедшего через эмульсию излучения, зафиксированная приемником; ε – молярный коэффициент экстинкции (поглощения) воды; L –длина оптического пути (толщина измерительной ячейки); c – искомая концентрация воды.

Для повышения достоверности измерений в современных приборах применяется многоканальная схема фильтрации [2] (рис. 1).

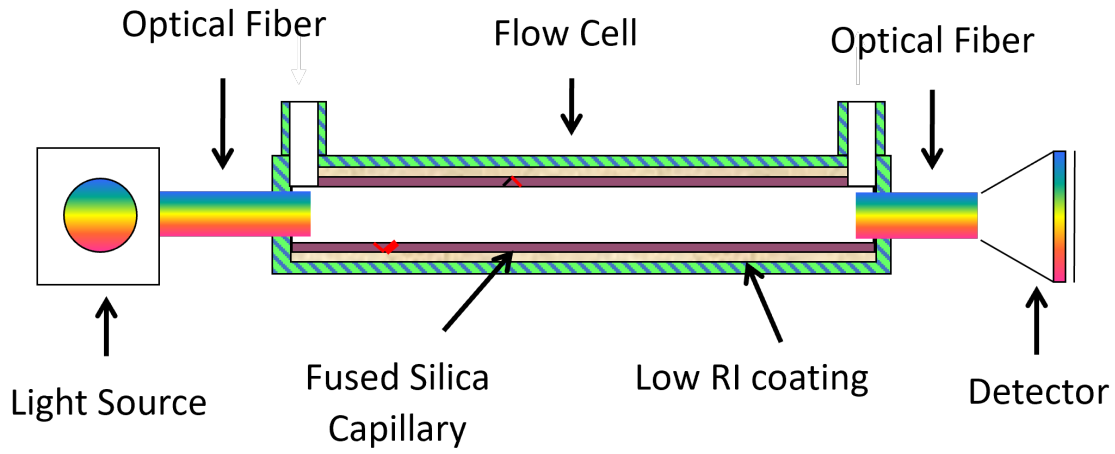



*Рис 1.* Принципиальная оптическая схема БИК анализатора поглощения: Light Source – источник ИК-излучения; Optical Fiber – оптическое волокно; Flow Cell – проточная измерительная кювета; Detector – фотоприемник (InGaAs)

Данный метод реализован в промышленных поточных влагомерах Red Eye компании Weatherford. В основе лежат измерительные окна из синтетического сапфира. Это обеспечивает устойчивость к абразивному износу песком и позволяет эксплуатировать приборы при высоких давлениях.

Приборы находятся в трубопроводе, помещенные путем разбора через фланцевые соединения или монтируются на обходной линии. Анализ потока происходит в реальном времени с частотой опроса до нескольких сотен измерений в секунду, что позволяет мгновенно реагировать на изменение режима работы скважины

Преимущества:

– Независимость показаний от минерализации (солености) воды.

– Отсутствие подвижных элементов в конструкции.

– Высокая точность при анализе легкой и средней нефти.

Недостатки:

– Эффект «ослепления» при работе в сверхплотной черной нефти.

– Чувствительность к загрязнению смолами измерительных окон.

**2. Метод светорассеяния**

Второй подход к анализу продукции скважин опирается на физическое рассеяние светового пучка на границах раздела фаз «вода-нефть». В

анализируемой методике глобулы воды рассматриваются как оптические неоднородности в сплошной нефтяной фазе. Эффект рассеяния возникает из-за существенной разницы показателей преломления воды (n≈1.33) и сырой нефти (n≈1.45-1.50 в зависимости от плотности и фракционного состава).

Поскольку характерные размеры капель в пластовых эмульсиях варьируются в диапазоне от 1 до 100 мкм, что значительно превышает длину волны зондирующего излучения (обычно 600-950 нм), процесс описывается классической теорией рассеяния Ми [3] (Mie scattering).

Интенсивность рассеянного сигнала описывается уравнением в рамках теории Ми, где распределение капель по размерам аппроксимируется функцией Гаусса.

Практическое применение: метод реализован в детекторах KAM OWD компании KAM Controls [4] для фиксации свободной воды. Окна из синтетического сапфира обеспечивают защиту от износа песком и работу при высоких давлениях. Приборы монтируются так, что через них проходит поток или на обходные линии, обеспечивая время реакции менее 1 секунды для мгновенного мониторинга состояния скважины.

Преимущества:

– Высокая чувствительность к следовым количествам влаги (0-15%).

– Мгновенное время реакции сенсора (менее 1 секунды).

Недостатки:

– Искажение результатов при наличии пузырьков газа в потоке.

– Нелинейность характеристик при высокой концентрации воды.

**3. Акустооптический метод и фотоакустическое детектирование**

Акустооптический (АО) метод получил такое название, так как он основан на взаимодействии ультразвука (акустики) и светового луча (оптики). Принцип измерения состава водонефтяных смесей здесь базируется на использовании эффекта дифракции Брэгга. Процесс анализа эмульсии заключается в том, чтобы по очереди выделять очень узкие спектральные интервалы из общего потока света, который дает источник. Главным элементом в этой схеме, например, выступает кристалл, обладающий определенными свойствами, диоксида теллура ($TeO_2$). Когда на него подается ультразвуковой сигнал от специального устройства - пьезопреобразователя, внутри кристалла возникает ультразвуковая волна, которая и управляет световым потоком

В результате длина волны света (λ), на выходе, напрямую зависит от частоты управляющего радиосигнала (f), подаваемой на кристалл. Чем выше частота звука, тем короче волна света. Математически эта связь выглядит как обратная пропорция[5]:

$$f = \frac{K1 \cdot \Delta n}{\lambda},$$

где $f$ – частота ВЧ-генератора; $K1$ – коэффициент, определяемый физическими параметрами акустооптической среды (скоростью звука в кристалле и геометрией взаимодействия); $\Delta n$ – двулучепреломление

кристалла, представляющее собой разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей; λ – длина волны излучения

Практическое применение: разработка настольных измерительных комплексов ориентированных на исследование проб сверхвязкой нефти, битумов и буровых растворов на нефтяной основе выполняется в основном в лабораторных условиях, в полной изоляции измерительной камеры от внешних акустических и вибрационных помех.

Примерами коммерческого применения, это спектрометры серии Luminar компании Brimrose (США). В частности, модель Luminar 5030 представляет собой портативный акустооптический анализатор, позволяющий проводить бесконтактное измерение состава жидкостей в режиме реального времени.

Преимущества:

– Работа с оптически плотными средами.

– Высокая информативность.

– Конструктивная надежность.

Недостатки:

– Малый объем зондирования.

– Загрязнение оптических поверхностей.

– Техническая сложность.

**4. Гибридный оптико-емкостной метод**

Гибридный подход основан на интеграции нескольких физических принципов в рамках единой измерительной системы. Данное решение направлено на устранение фундаментальных ограничений изолированных датчиков.

Радиочастотный (емкостной) канал фиксирует комплексную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{mix}$. Учитывая значительный контраст между проницаемостью воды и нефти, метод обладает высокой чувствительностью к объемной доле влаги [2]. Для компенсации влияния солености, вызывающей фазовые искажения и погрешности из-за проводимости ионов, применяется оптический ИК-канал. Фотоны ближнего ИК-диапазона не взаимодействуют с растворенными солями, что позволяет использовать оптические данные как эталон для математической «очистки» радиочастотного сигнала. Обработка ведется алгоритмами адаптивной фильтрации.

Практическое применение: технология интегрируется в многофазные расходомеры (MPFM) для коммерческого учета продукции скважин на месторождениях ПАО «Транснефть» и ПАО «Газпром нефть». Гибридные системы востребованы при разработке трудно извлекаемых запасов, где инверсия фаз эмульсии и экстремальная соленость делают невозможным использование одноканальных приборов [6].

Преимущества:

– Обеспечение достоверности данных во всем диапазоне (0-100%) при изменении солевого состава и фазового состояния эмульсии.

– Снижение материалоемкости.

– Устойчивость к солености.

Недостатки:

– Трудоемкость настройки.

– Стоимость системы.

*Таблица 1*

Сравнение методов анализа

| Метод | Физический принцип | Главное преимущество | Ограничения и недостатки | Реальные приборы |
|---|---|---|---|---|
| NIR-спектроскопия | Поглощение света (Закон Бугера-Ламберта) | Независимость от солености; нет подвижных деталей. | Полное "ослепление" в очень тяжелой, черной нефти | Weatherford Red Eye |
| Светорассеяние | Рассеяние на каплях (Теория Ми) | Чувствительность к малым долям воды (0-15%). | Сильные искажения при наличии пузырьков газа | KAM OWD |
| Фотоакусти-ческий | Дифракция Брэгга и фотоакустический эффект | Электронная перестройка волны; работа в непрозрачных средах. | Сложность термокомпенсации параметров кристалла. | Brimrose Luminar, SLB IFA |
| Гибридный | Слияние данных (Оптика + СВЧ) | Точность во всем диапазоне (0-100%); учет минерализации. | Высокая стоимость оборудования и сложная математика | Agar MPFM |

**Заключение**

В ходе анализа установлено, что выбор метода контроля зависит от физико-химических свойств флюида. Традиционная ИК-спектроскопия эффективна для легких и средних нефтей, в то время как применение систем на базе акустооптических фильтров (АОПФ) в сочетании с фотоакустическим детектированием позволяет проводить замеры в тяжелом и оптически непрозрачном сырье. Наиболее универсальными для узлов коммерческого учета являются гибридные системы, которые за счет совмещения оптического и радиочастотного каналов нивелируют влияние переменной минерализации воды. Это позволяет обеспечить погрешность измерения обводненности в пределах ±0,5%, что соответствует требованиям ГОСТ Р 8.615-2005

## Библиографический список

1. Тронов В.П. Промысловая подготовка нефти // Казань: Изд-во «Фэн», 2000. – 416с.

2. WPI Europe. Liquid Waveguide Capillary Cells (LWCC) for Spectroscopy. [Электронный ресурс]. URL: https://www.wpi-europe.com/products/spectroscopy/flow-cells/lwcc-liquid-waveguide-capillary-cell.aspx (дата обращения: 12.05.2026)

3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник. Книга 2. // СПб: Политехника, 2004. – 412 с.

4. KAM Controls. OWD – Optical Water Detector. [Электронный ресурс]. – URL: https://kam.com/products/kam-owd-optical-water-detector

5. Мухамадиев. А.А. Анализ приборной базы для проведения исследований флюидов / А. А. Мухамадиев, И. И. Шайхутдинов, В. Х. Ясовеев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15, № 1. – С. 122–127.

6. ГОСТ Р 8.615-2005. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. – М. : Стандартинформ, 2005.

© Хафизов Б.А., 2026

УДК 681.518.22

Д.Г. ИРАЕВ, В.Г. ГУБАЙДУЛЛИН
*iraev.d@mail.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент А.А. МУХАМАДИЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРИМЕНЕНИЕ STM32N6 И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПЧЕЛИНОЙ СЕМЬИ ПО АУДИО- И ВИДЕОМОНИТОРИНГУ

*Аннотация.* Рассматриваются возможности нового микроконтроллера STM32N6 со встроенным ускорителем Neural-ART для решения задач машинного обучения и компьютерного зрения в сельском хозяйстве, в частности в пчеловодстве. Описаны реализованные проекты автоматического подсчета пчел и выявления хищников, обнаружения матки и оценки расплода, а также возможности акустического мониторинга для прогнозирования роения и диагностики заболеваний.

*Ключевые слова:* STM32N6; мониторинг пчел; компьютерное зрение; пчеловодство; умный улей; акустический мониторинг.

Традиционно задачи машинного обучения и компьютерного зрения в сельском хозяйстве и биоакустике решались с помощью мощных одноплатных компьютеров или облачных серверов. Однако развитие микроэлектроники привело к появлению устройств, способных выполнять сложные нейросетевые вычисления непосредственно на периферии, в полевых условиях, с минимальным энергопотреблением. Флагманом этой революции стала платформа STM32N6 (рис. 1) от STMicroelectronics – первый в мире микроконтроллер, оснащенный собственным нейропроцессором (NPU) Neural-

ART Accelerator, открывающий путь для создания автономных систем мониторинга, в том числе и в пчеловодстве.

Хотя STM32N6 позиционируется как микроконтроллер, его технические характеристики сопоставимы с микропроцессорами недавнего прошлого. Сердцем платформы является ядро Arm Cortex-M55, работающее на частоте 800 МГц и дополненное векторным расширением Helium, что значительно ускоряет цифровую обработку сигналов. Однако ключевое отличие заключается в наличии аппаратного NPU с тактовой частотой 1 ГГц, обеспечивающего производительность до 600 млрд операций в секунду. Это в 600 раз превышает показатели предыдущих высокопроизводительных чипов семейства STM32 и имеет возможность обучать сложные нейросети в режиме реального времени без подключения к сети [1].

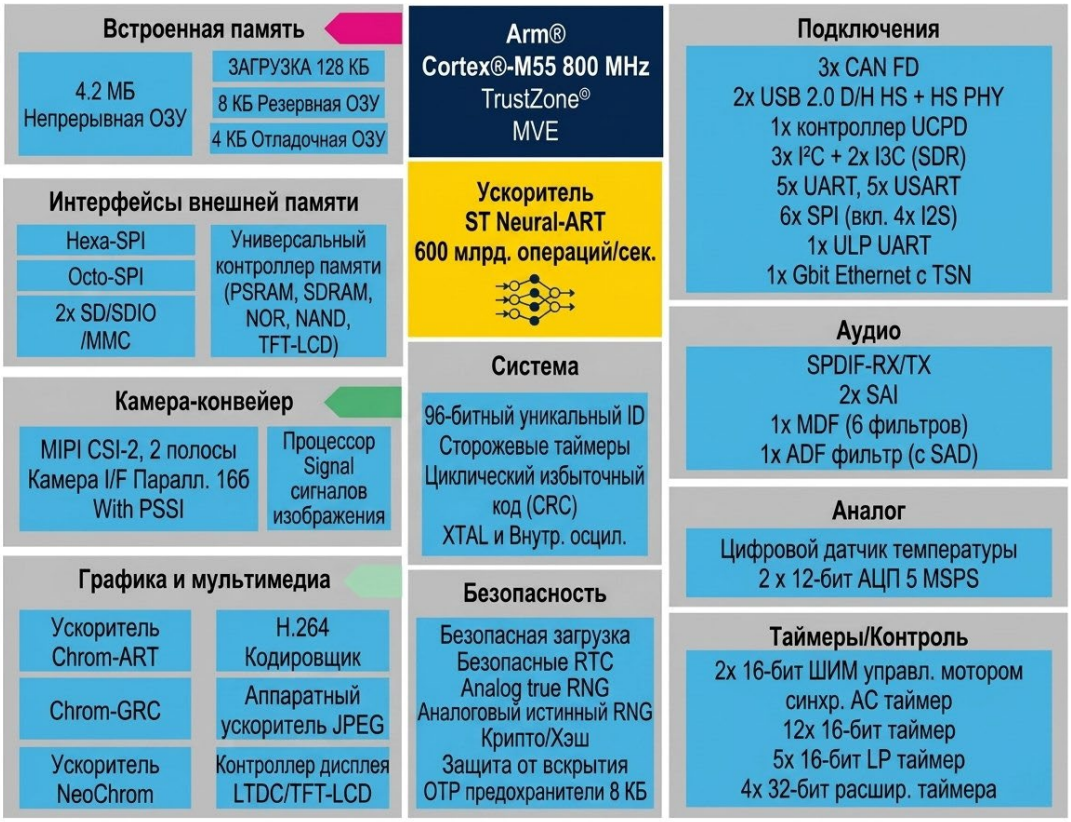



*Рис. 1* Архитектура микроконтроллера STM32N6

Для задачи пчелиного мониторинга критически важны расширенные мультимедийные возможности. Наличие интерфейса MIPI CSI-2 и выделенного сигнального процессора изображений позволяет напрямую подключать недорогие CMOS-камеры для визуального контроля летковой зоны. Встроенный H.264 энкодер и JPEG-ускоритель обеспечивают эффективное сжатие видеоизображения для удаленного анализа. Аудиоканал с высокой частотой дискретизации дает возможность захватывать спектр жужжания, который является индикатором состояния семьи. При этом чип оснащен 4,2 МБ встроенной оперативной памяти, что достаточно для буферизации данных и

работы легковесных моделей машинного обучения без внешнего хранилища [2].

Первой наглядной демонстрацией возможностей чипа именно в пчеловодстве стал проект ABCD (Ai Bee Counting Discrimination system). В его основе лежит задача автоматического подсчета особей и выявления хищников вблизи улья. Система использует внешнюю камеру, подключенную по MIPI, и детектор объектов на базе алгоритма YOLO. Нейронная сеть обучена классифицировать движущиеся объекты на пчел и шершней, анализируя не только статичные кадры, но и сценарии поведения: суетливое возвратно-поступательное движение пчел отличается от «зависающего» полета охотящегося шершня.

Принципиальная реализуемость проекта подтверждает способность STM32N6 не только вести подсчет, но и выполнять пороговую логику тревоги. При превышении допустимой частоты появления шершней система формирует аварийное оповещение и отображает статистику на LCD-экране. Архитектура ABCD предусматривает развитие: внедрение внутренней камеры и микрофона для проверки данных. Если визуальный канал фиксирует подозрительную активность, звуковой анализ жужжания способен подтвердить или опровергнуть тревогу, уменьшая число ложных срабатываний [3].

До появления STM32N6 исследователи уже пытались внедрять элементы ИИ на менее производительных чипах семейства STM32. Проект BroodMinder AI известен использованием внутренней камеры для оценки плотности расплода и идентификации матки в улье. Методика базируется на сверточных нейронных сетях, которые работали на пределе возможностей старых процессоров без аппаратного ускорения. Перенос этой модели на архитектуру STM32N6 с Neural-ART акселератором увеличивает скорость и точность обнаружения, позволяя пасечнику своевременно узнавать о признаках изменений внутри семьи [4].

Акустический мониторинг также переживает перерождение благодаря NPU. Проект BeeSound ранее продемонстрировал впечатляющие результаты: классическая модель машинного обучения (метод опорных векторов) с точностью 85% предсказывала роевое состояние за 2-3 дня до его наступления, анализируя спектрограммы, полученные с микрофона внутри корпуса. Точность ограничивалась сложностью предварительной обработки сигнала и статичностью модели [5].

Проект birdnet-stm32, разработанный для классификации птиц по пению, показал готовый проект для STM32N6: создание компактной модели, обучение на мел-спектрограммах и квантование с последующей тренировочной оптимизацией. Эта методология напрямую переносится на задачу классификации акустических паттернов пчел. В отличие от традиционных цифровых фильтров, нейронная сеть на NPU способна различать тонкие гармонические искажения, возникающие при заболевании варроатозом или подготовке к роению, делая диагностику непрерывной и энергоэффективной [6, 7].

Максимальная эффективность достигается при объединении разнородных каналов данных. Так, анализ видео обеспечивает идентификацию хищников и оценку интенсивности лета, в то время как внутренний микрофон проводит спектральный анализ гула для выявления роевого настроения или болезней расплода. Объединение этих методов на одном кристалле STM32N6 создает «умный улей», способный реагировать на угрозы в автономном режиме. Низкое тепловыделение чипа позволяет питать систему от солнечной панели и Li-Ion аккумулятора в течение всего сезона без обслуживания.

**Библиографический список**

1. STM32N6: STMicroelectronics' First Edge AI MCU with NPU // EdgeAI : сайт. 2025. URL: https://edge-ai-tech.eu/stm32n6-stmicroelectronics-first-edge-ai-mcu/ (дата обращения: 24.04.2026).

2. STMicroelectronics Boosts Edge AI with NPU-Equipped STM32N6 Microcontrollers // Bisinfotech: сайт. 2025. URL: https://www.bisinfotech.com/stmicroelectronics-boosts-edge-ai-with-npu-stm32/ (дата обращения: 24.04.2026).

3. STM32n6 bee counting & hornets monitorring system (ABCD Project) // Elektor Labs: сайт. URL: https://www.elektormagazine.nl/labs/stm32n6-bee-counting-hornets-monitorring-system (дата обращения: 24.04.2026).

4. BroodMinder // BroodMinder : сайт. URL: https://broodminder.com/ (дата обращения: 24.04.2026).

5. Audio-based-identification-of-beehive-states (BeeSound Project) // GitHub : сайт. URL: https://github.com/MiracleIsHere/Audio-based-identification-of-beehive-states (дата обращения: 24.04.2026).

6. Birdnet-stm32 // GitHub: сайт. URL: https://github.com/Orwebcraft-ecologsts-association/birdnet-stm32 (дата обращения: 24.04.2026).

7. Nolasco I., Benetos E. To bee or not to bee: An annotated dataset for beehive sound recognition // Zenodo: сайт. 2018. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.1321278 (дата обращения: 24.04.2026).

© Ираев Д.Г., Губайдуллин В.Г., 2026

УДК 681.586.5

А.А. ЯКИМЕНКО
*yakimenko_andreu@mail.ru*
Науч. руковод. – д-р техн. наук, проф. В.Х. ЯСОВЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Аннотация.* Рассмотрены принцип действия, конструктивные особенности и методика расчёта магнитооптических датчиков на эффекте Фарадея. Проведен сравнительный анализ схем чувствительных элементов и способов снижения влияния линейного двулучепреломления. Приведён пример расчёта датчика с объемным элементом на феррит-гранатовой пленке. Обсуждаются вопросы температурной стабильности и шумовых характеристик.

*Ключевые слова:* магнитооптический датчик; эффект Фарадея; волоконно-оптический датчик; магнитное поле; электрический ток; феррит-гранатовая плёнка.

## Введение

Магнитооптические датчики (МОД) тока и магнитного поля находят всё более широкое применение в измерительной технике, энергетике, промышленной автоматике и системах управления благодаря таким преимуществам, как гальваническая развязка высоковольтных цепей и измерительной аппаратуры, высокая помехозащищенность от внешних электромагнитных воздействий, широкий динамический диапазон и практически полное отсутствие обратного влияния на измеряемую цепь [1, 2]. Основой работы подавляющего большинства подобных устройств является продольный магнитооптический эффект Фарадея, состоящий в повороте плоскости поляризации линейно-поляризованного света, проходящего через оптически прозрачную среду, помещенную в продольное магнитное поле [1, 3].

## Эффект Фарадея и материалы чувствительных элементов

Магнитооптический эффект Фарадея описывается выражением:

$$\theta_F = V \int_0^L H \cdot dl, \quad (1)$$

где: $\theta_F$ – угол поворота плоскости поляризации, $V$ – постоянная Верде (зависящая от материала и длины волны излучения), $H$ – проекция напряженности магнитного поля на направление распространения света, $L$ – длина оптического пути в активной среде.

В случае однородного поля и фиксированной длины $L$ выражение упрощается до $\theta_F$ =VHL [2, 3].

Важной особенностью эффекта является его невзаимность: при обратном прохождении луча плоскость поляризации поворачивается в ту же сторону относительно кристаллографических осей, что приводит к удвоению угла при многократном прохождении.

Постоянная Верде различных материалов варьируется в широких пределах. Для диамагнетиков (кварцевое стекло, свинцовое стекло) характерна слабая температурная зависимость чувствительности, но относительно малая величина эффекта. Ферромагнитные плёнки на основе замещенных феррит-гранатов, особенно содержащие висмут, обладают на два–три порядка большей вращательной способностью, однако их линейный диапазон ограничен полем насыщения [2].

**Структурные схемы и проблема двулучепреломления**

Волоконно-оптические датчики на эффекте Фарадея подразделяются на две большие группы: «цельно волоконные», в которых само оптическое волокно служит одновременно и чувствительным элементом, и линией передачи, и датчики с «объёмным» чувствительным элементом, где волокно используется только для доставки излучения к кристаллу и отвода модулированного сигнала [1, 3]. В обоих случаях обобщенная схема измерителя (рис. 1) содержит источник излучения, поляризатор, магнито-активную среду, анализатор и фотоприемник.

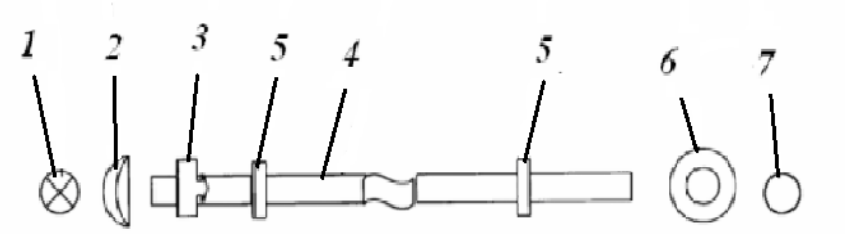



*Рис 1.* Волоконно-оптический датчик магнитного поля:1 – источник излучения; 2 – устройство введения излучения в оптическое волокно; 3 – модовый фильтр; 4 – оптическое волокно; 5 – пленки магнитооптического материала, расположенные в промежуточной части оптического волокна; 6 – модовый демультиплексор; 7 – фотоприемное устройство

Цельноволоконные датчики страдают от паразитного линейного двулучепреломления (ЛДП), возникающего из-за изгибов волокна при намотке на каркас или шину. ЛДП характеризуется коэффициентом β и приводит к тому, что реальная константа Верде заменяется эффективной:

$$V_{eff} = V\frac{\sin \beta L}{\beta L}, \quad (2)$$

где $V_{eff}$ - эффективная постоянная Верде; $\beta$ – величина линейного двулучепреломления.

При больших βL чувствительность может полностью исчезнуть. Для борьбы с этим эффектом применяют скручивание волокна (создающее сильное циркулярное двулучепреломление), либо высокотемпературный отжиг (~800 °C), снимающий механические напряжения [1, 4].

В датчиках с объёмным чувствительным элементом (кристаллом или плёнкой) чаще используют однопроходную оптическую схему, показанную на рис. 2.

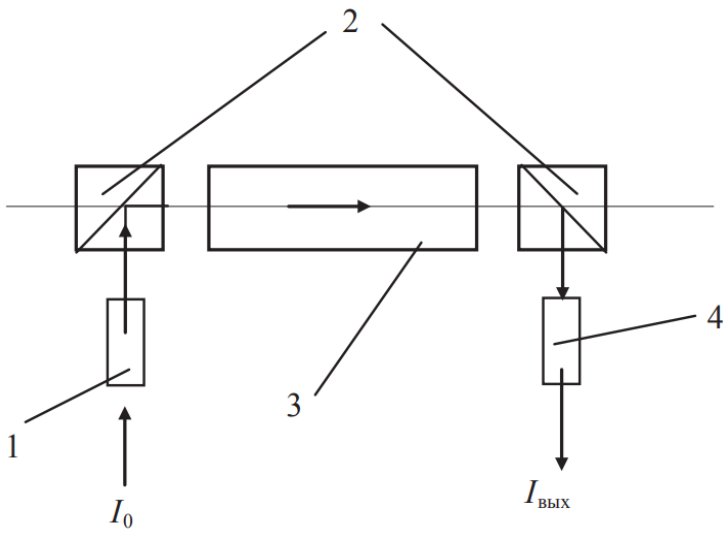



*Рис 2.* Оптическая схема чувствительного элемента проходного типа: 1, 4 – градиентные линзы; 2 – поляризационные делительные кубики; 3 – магнитооптический кристалл; $I_0$, $I_{вых}$ –интенсивность света на входе и выходе соответственно.

Интенсивность излучения на выходе анализатора подчиняется закону Малюса. Если угол между осями поляризатора и анализатора установлен равным 45°, то:

$$P_{out} = \frac{P_0}{2}(1 + sin2\theta_F), \quad (3)$$

где $P_{out}$ – оптическая мощность на выходе анализатора; $P_0$ интенсивность на входе анализатора. Линейный режим сохраняется при углах $\theta_F \leq 7°$(нелинейность <1%).

Двухпроходная схема дает коэффициент преобразования S=2VL и, как показано в [5], менее чувствительна к остаточному линейному двулучепреломлению. Многопроходные конфигурации с чётным числом проходов теоретически линейно наращивают чувствительность, однако влияние неустраненных ЛДП может приводить к непропорциональному росту сигнала и даже его снижению при больших длинах оптического пути. С учётом широкого динамического диапазона и простоты реализации оптимальной признается однопроходная система при условии принятия мер по минимизации ЛДП [5].

**Шумовые характеристики и пороговая чувствительность**

Основным информативным параметром поляриметрического датчика на эффекте Фарадея является сигнальный ток I, возникающий в цепи фотоприемника. Без учёта постоянной составляющей этот ток определяется выражением:

$$I = \eta P_0 NVi, \quad (4)$$

где: η – квантовая эффективность приемника (А/Вт); $P_0$– оптическая мощность на входе анализатора (Вт); N – число витков оптического волокна вокруг проводника с током;V– постоянная Верде материала волокна (рад/(Тл·м)); i – измеряемый электрический ток (А).

Именно этот ток несёт информацию о величине магнитного поля или тока и должен быть зарегистрирован на фоне собственных шумов измерительного тракта.

Помимо полезного сигнала, в выходной цепи всегда присутствуют флуктуации, ограничивающие предельную чувствительность прибора. Основными источниками шума являются дробовый шум фотоприемника и тепловой шум нагрузочного резистора. Их соотношение и определяет минимально разрешенный ток на единицу полосы пропускания. Как показано в пособии [2], порог чувствительности реальных датчиков, как правило, лимитируется тепловым шумом при сопротивлениях нагрузки менее нескольких килоом. Низкочастотные механические и тепловые возмущения также вносят вклад, однако на рабочих частотах (50–60 Гц и выше) их влияние обычно несущественно.

**Пример расчёта датчика с феррит‑гранатовой плёнкой**

В качестве примера рассмотрим датчик на основе плёнки $(YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$ толщиной l=2 мкм, обладающей постоянной Верде: V=49 мин/(Э·см) [2]. Пересчет в СИ: 1 мин/(Э·см) = 290,9 рад/(Тл·м) V=1,425·$10^4$ рад/(Тл·м). Используется лазерный диод АТС-С500-35 (λ = 808 нм, мощность 0,5 Вт). Измеряемое магнитное поле: напряжённость H=1000 А/м.

Переводим напряжённость поля в магнитную индукцию:

$$B = \mu_0 H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 = 1{,}257 \cdot 10^{-3}\ \text{Тл},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$Тл·м/А - магнитная постоянная; B – магнитная индукция (Тл); H - напряженность (А/м).

Угол поворота плоскости поляризации рассчитывается по Формуле эффекта Фарадея:

$$\theta_F = \text{VBL} = 3{,}58 \cdot 10^{-5}\ \text{рад},$$

где V – постоянная Верде (1,425·$10^4$ рад/(Тл·м)); B – индукция (Тл); L – длина (м).

Оптический сигнал на выходе анализатора. При условии, поляризатор и анализатор скрещены под 45°. По закону Малюса:

$$P_{out} = \frac{P_0}{2}(1 + sin2\theta_F) = 250\ \text{мВт}.$$

Полезный оптический сигнал:

$$\Delta P = \frac{P_0}{2} \cdot 2\theta_F = 0{,}0179\ \text{мВт}.$$

Фотоприёмник – кремниевый PIN‑диод с токовой чувствительностью S=0,5 А/Вт, преобразует свет в электрический сигнал:

$$\text{I} = \Delta P \cdot S = 9\ \text{мкА},$$

где I – фототок (А); $\Delta P$– амплитуда переменной оптической мощности.

Ток преобразуется в напряжение на нагрузочном резисторе (сопротивление в цепи фотодиода или трансимпедансного усилителя). По закону Ома:

$$U = I \cdot R = 0{,}9 \text{ В},$$

где: U – напряжение (В); I – ток (А); R– сопротивление (Ом).

Вывод: даже при микроскопической толщине плёнки и очень малом угле поворота поляризации (~0,002°) современные компоненты позволяют получить на выходе датчика сигнал порядка 0,9 В, что вполне достаточно для надежного измерения.

**Заключение**

Магнитооптические датчики тока и магнитного поля, основанные на эффекте Фарадея, представляют собой класс приборов, сочетающих высокую точность, быстродействие и полную гальваническую развязку. Анализ различных оптических схем чувствительных элементов показывает, что однопроходная конфигурация является оптимальной с точки зрения широкого динамического диапазона и минимальных дополнительных погрешностей при условии принятия мер по подавлению линейного двулучепреломления. Применение ферритгранатовых пленок с высокой постоянной Верде позволяет создавать компактные датчики с микро размерной активной зоной и выходным сигналом, достаточным для практического использования.

## Библиографический список

1. Бурков, В.Д. Анализ и выбор оптимальной системы волоконно-оптического датчика электрического тока / В.Д. Бурков, Н.А. Харитонов, А.Н. Демин // Лесной вестник. – 2014. – № 2. – С. 127–132.

2. Гавричев, В. Д. Волоконно-оптические датчики магнитного поля: учеб. пособие / В. Д. Гавричев, А. Л. Дмитриев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 84 с.

3. Липницкая, С.Н. Моделирование оптических систем оптоэлектронных приборов: учеб. пособие / С.Н. Липницкая, А.Е. Романов, Д.А. Бауман, В.Е. Бугров. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 59 с.

4. Ураксеев, М.А. Принципы построения магнитооптических датчиков магнитного поля на эффекте Фарадея / М.А. Ураксеев, К.В. Соловей // Вестник УГАТУ: Электроника, измеритеная техника инф.-измерительные и управляющие системы . – 2007. – № 1. – С. 204–208.

5. Бурков, В.Д. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических приборов и систем: практикум / В.Д. Бурков, В.Т. Потапов. – М.: МГУЛ, 2011.

© Якименко А.А., 2026

УДК 621.396.13

Р.Р. КОДО
*codorol22@gmail.com*
Науч. руководов. – д-р техн. наук, проф. В.С. ФЕТИСОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО РАДИОЧАСТОТНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ОГРАНИЧЕННОЙ ЗОНЕ

*Аннотация.* В работе рассматривается задача реализации системы локального позиционирования объектов в ограниченной зоне с использованием радиочастотных излучающих сенсоров. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения надёжного определения координат в условиях, где применение глобальных навигационных спутниковых систем затруднено или невозможно. В качестве основы системы используются радиочастотные маяки, позволяющие определять положение объекта на основе анализа уровня принимаемого сигнала. Представлена структура системы, включающая передающие узлы, приёмный модуль и вычислительный блок. Рассмотрен алгоритм определения координат на основе метода трилатерации. Выполнен анализ факторов, влияющих на точность позиционирования. Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанной системы для задач локального позиционирования в ограниченных пространствах.

*Ключевые слова:* локальное позиционирование, радиочастотные маяки, RSSI, трилатерация, радиочастотные сенсоры, измерительные системы, навигация.

## Введение

Задача определения координат объектов в пространстве является одной из ключевых в современных информационно-измерительных системах. Она находит широкое применение в различных областях техники, включая робототехнику, логистику, автоматизированные производственные системы и авионику [8]. Наиболее распространённым решением данной задачи являются глобальные навигационные спутниковые системы, такие как GPS и ГЛОНАСС [1].

Однако использование спутниковых систем ограничено в условиях закрытых помещений, ангаров, складов и зон с экранированием сигнала. Кроме того, точность позиционирования в сложных условиях может существенно снижаться. В связи с этим возрастает интерес к разработке локальных систем позиционирования, способных обеспечивать стабильную работу в ограниченной зоне [5].

Одним из перспективных подходов является использование радиочастотных излучающих сенсоров, выполняющих функцию маяков [2, 3]. Такие системы позволяют определять координаты объекта на основе анализа параметров принимаемого сигнала.

Целью данной работы является реализация системы локального радиочастотного позиционирования и анализ принципов её функционирования.

## 1. Структура и принцип работы системы

Разрабатываемая система (рис. 1) локального позиционирования включает следующие основные компоненты:

– радиочастотные маяки (передатчики);
– приёмный модуль;
– вычислительный блок;
– программное обеспечение обработки данных.

Радиочастотные маяки размещаются в известных координатах внутри ограниченной зоны. Каждый маяк периодически излучает сигнал фиксированной мощности [4].

Приёмный модуль, установленный на объекте позиционирования, принимает сигналы от нескольких маяков и измеряет уровень мощности сигнала (RSSI) [6].

Далее измеренные значения передаются в вычислительный блок, где осуществляется:

– преобразование RSSI в расстояние;
– вычисление координат объекта;
– фильтрация шумов измерений.

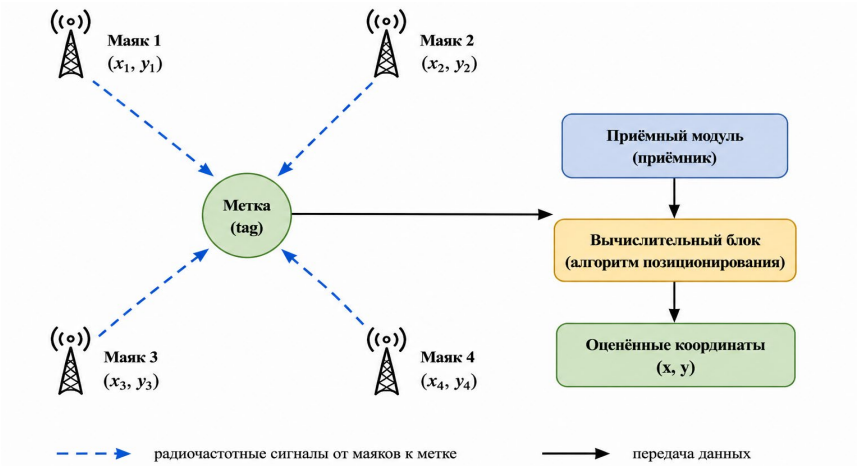



*Рис. 1.* Структура системы локального радиочастотного позиционирования

Принцип работы системы основан на определении расстояний до нескольких маяков и последующем вычислении координат методом трилатерации [1].

Радиолокация основывается на принципе распространения электромагнитных волн и анализе параметров отражённого или принятого

сигнала [7]. В контексте локальных систем позиционирования используется активный или пассивный приём радиосигналов от заранее известных источников [3].

**2. Математическая модель позиционирования**

Определение расстояния между маяком и приёмником осуществляется на основе модели зависимости уровня сигнала от расстояния [2,6]:

$$RSSI = -10n\log_{10}(d) + A,$$

где $d$ — расстояние до маяка; $n$ — коэффициент затухания среды; $A$ — уровень сигнала на расстоянии 1 метр.

После преобразования определяется расстояние до каждого маяка следующим образом:

$$d = 10^{\frac{A-RSSI}{10n}}.$$

Координаты объекта вычисляются методом трилатерации [4]. Для трёх маяков система уравнений имеет вид:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2,$$

где $(x_i, y_i)$ — координаты маяков; $d_i$ — расстояния до маяков.

Решение системы позволяет определить координаты объекта (рис. 2).

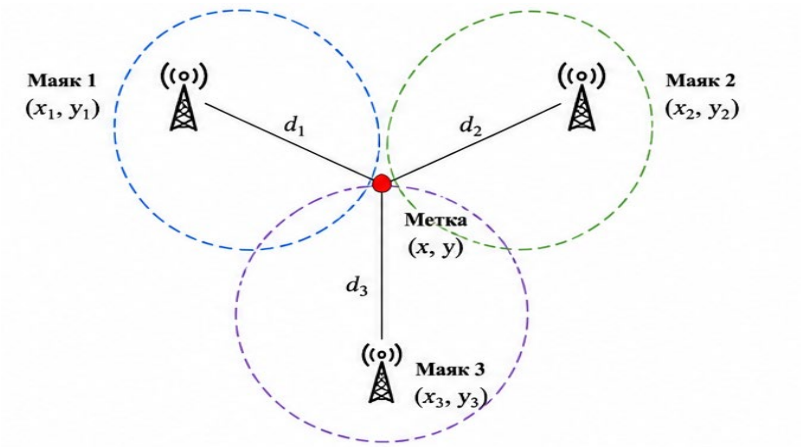



*Рис. 2.* Геометрическая интерпретация метода трилатерации

**3. Ожидаемые результаты и область применения**

Алгоритм функционирования системы имеет следующие этапы (рис.3):

1. Приём сигналов от радиочастотных маяков;
2. Измерение уровня сигнала (RSSI);
3. Вычисление расстояний до маяков;
4. Определение координат методом трилатерации;
5. Фильтрация результатов;
6. Вывод координат объекта.




*Рис. 3.* Поток обработки данных

**4. Анализ факторов, влияющих на точность**

Точность локального позиционирования определяется рядом факторов [5, 8]:

– многолучевое распространение сигнала;
– наличие радиопомех;
– геометрия размещения маяков;
– параметры среды распространения;
– нестабильность измерений RSSI.

Погрешность определения расстояния связана с ошибкой измерения уровня сигнала [3]:

$$\Delta d \sim \Delta RSSI.$$

Для уменьшения влияния указанных факторов применяются методы фильтрации данных, предварительная калибровка системы и оптимизация размещения маяков [4, 6].

Одним из перспективных способов повышения точности позиционирования является использование технологий сверхширокополосной связи (UWB). В отличие от методов, основанных на измерении уровня сигнала (RSSI), UWB позволяет определять расстояние на основе времени распространения сигнала [5]. Это обеспечивает более высокую точность измерений и снижает влияние многолучевого распространения и радиопомех. Таким образом, применение UWB-технологий может существенно повысить точность локального позиционирования.

**5. Анализ факторов, влияющих на точность**

Основные характеристики реализованной системы приведены в табл. 1 и рис 4.

Таблица 1

Основные характеристики реализованной системы

| **Параметр** | **Значение** |
|---|---|
| Количество маяков | 3–5 |
| Рабочая зона | до 20 × 20 м |
| Частота сигнала | 2.4 ГГц |
| Метод измерения | RSSI |
| Средняя погрешность | 0.5–1.5 м |

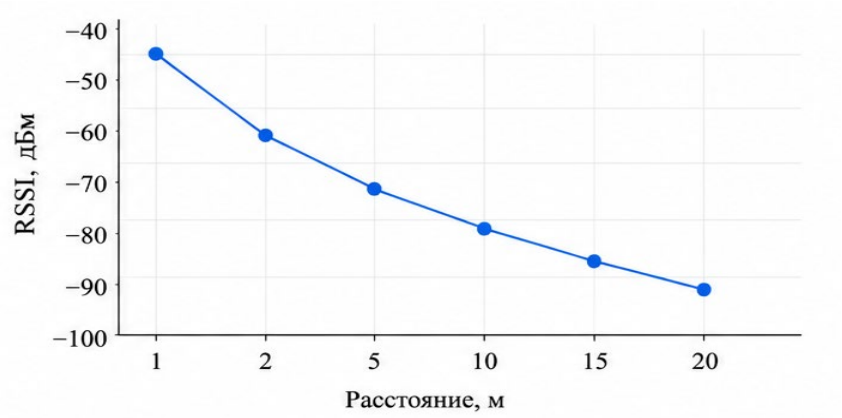



*Рис. 4.* Зависимость уровня сигнала RSSI от расстояния

**Заключение**

В работе представлена реализация системы локального радиочастотного позиционирования объектов в ограниченной зоне на основе использования радиочастотных маяков и измерения уровня принимаемого сигнала (RSSI). Разработана структура системы, включающая передающие узлы, приёмный модуль и вычислительный блок, а также предложен алгоритм определения координат с использованием метода трилатерации.

В ходе исследования проанализированы основные факторы, влияющие на точность позиционирования, включая многолучевое распространение сигнала, радиопомехи и особенности размещения маяков. Показано, что данные факторы оказывают существенное влияние на результаты измерений и требуют применения методов фильтрации и калибровки системы.

Полученные результаты демонстрируют возможность реализации локального позиционирования с использованием RSSI в условиях ограниченной зоны с погрешностью порядка 0.5–1.5 м, что подтверждает применимость предложенного подхода для практических задач.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой гибридных систем позиционирования, объединяющих методы RSSI и UWB, а также с применением более совершенных алгоритмов обработки сигналов для повышения точности и устойчивости работы системы.

**Библиографический список**

1. Skolnik M. I. Introduction to Radar Systems. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 772 p.

2. Patwari N. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks / N. Patwari, J. Ash, S. Kyperountas [et al.] // IEEE Signal Processing Magazine. – 2005. – Vol. 22, № 4. – P. 54–69.

3. Gezici S. A survey on wireless position estimation // Wireless Personal Communications. – 2008. – Vol. 44, № 3. – P. 263–282.

4. Bahl P. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system / P. Bahl, V. Padmanabhan // IEEE INFOCOM 2000: Proceedings of the Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Tel Aviv, Israel, 26–30 March 2000). – Tel Aviv: IEEE, 2000. – Vol. 2. – P. 775–784.

5. Zafari F. A survey of indoor localization systems and technologies / F. Zafari, A. Gkelias, K. Leung // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, № 3. – P. 2568–2599.

6. Faragher R. Location fingerprinting with Bluetooth low energy beacons / R. Faragher, R. Harle // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2015. – Vol. 33, № 11. – P. 2418–2428.

7. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. – 707 p.

8. Hightower J. Location systems for ubiquitous computing / J. Hightower, G. Borriello // IEEE Computer. – 2001. – Vol. 34, № 8. – P. 57–66.

© Кодо Р.Р., 2026

УДК 004.354

Ф.Р. КОКОРЫШКИН
*fedorkoko@gmail.com*
Науч. руковод. – ст. преп. Е.Ф. НУРЛЫГАЯНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

*Аннотация*. В данной статье рассматривается разработка программного кода для блока, позволяющего взаимодействовать с различными устройствами в 3 осях.

*Ключевые слова*: микроконтроллер, акселерометр, датчик, интерфейс человек-компьютер, передача данных.

### Введение

Бурное развитие электронной промышленности требует совершенствования систем дистанционного управления объектами и их компьютерными моделями в процессе проектирования. Подобные устройства находят широкое применение для работы в САПР и управления промышленными манипуляторами и дронами. Существующие устройства дистанционного управления имеют на данный момент ряд ограничений и недостатков. Поиск новых решений обусловлен необходимостью кардинально повысить качество управления электронными устройствами.

**Принцип работы блока**

На рис. 1 представлена структурная электрическая схема разрабатываемого блока. Основная его задача – обработка цифровых данных, поступающих с микросхемы IMU (от англ. Inertial Measurement Unit) – инерциальный измерительный блок, состоящий в данном случае из акселерометра и гироскопа [4]. Микроконтроллер принимает эти данные и обрабатывает их с помощью встроенных цифровых фильтров, а также алгоритмов преобразования цифрового кода в значения физического перемещения устройства в пространстве [2, 3]. Сформированные управляющие команды передаются на устройство пользователя (компьютер или целевой контроллер) по беспроводному каналу связи с использованием протокола Bluetooth. Электропитание блока осуществляется от встроенного аккумулятора с возможностью зарядки через интерфейс USB (Universal Serial Bus) или посредством беспроводной связи – через воздушный трансформатор (индукционная катушка) [1]. На рис. 2 представлен тестовый макет собранного блока управления.




*Рис. 1.* Схема электрическая структурная возможной реализации устройства

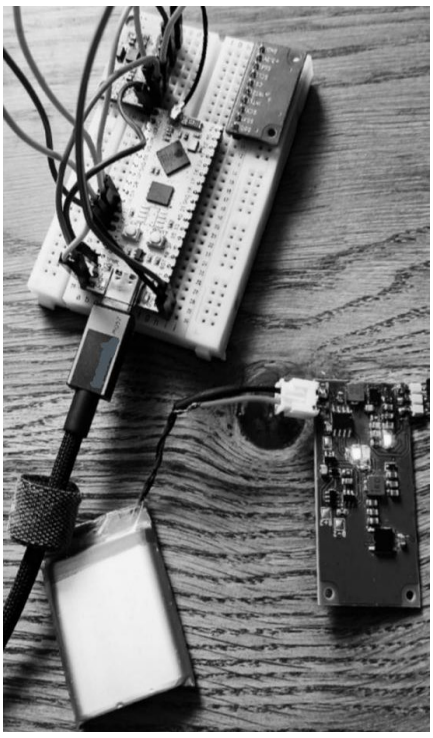


*Рис. 2.* Тестовый макет блока

**Измерение изменения координат с помощью акселерометра и гироскопа**

Главная задача устройства – определение изменения положения устройства в пространстве на основе данных, получаемых с акселерометра и гироскопа. Гироскоп измеряет угловую скорость (град/с или рад/с), а акселерометр – линейное ускорение (м/с²), включая проекцию вектора гравитации.

Для вычисления пространственной ориентации в 3-х осях, угловая скорость, измеренная гироскопом, интегрируется по времени.

Уравнение для расчёта скорости имеет вид:

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a_{\text{ист}}(\tau)\, d\tau,$$

где $v(t)$ – текущая скорость; $v_0$ – начальная скорость (обычно принимается равной нулю при старте); $a_{\text{ист}}$ – «истинное» собственное ускорение объекта (без гравитационной составляющей).

Однако у этого подхода есть принципиальный недостаток: ошибки измерения (дрейф нуля, шумы) накапливаются, что приводит к линейно растущей погрешности ориентации.

На практике для повышения точности применяется слияние данных гироскопа и акселерометра (комплементарный фильтр, фильтр Маджвика или фильтр Калмана).

**Определение ориентации (с помощью гироскопа).**

Прежде чем вычитать гравитацию, необходимо знать, как ориентирован блок в пространстве. Для этого используются данные гироскопа:

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega(\tau)\, d\tau,$$

где $\omega$ — угловая скорость.

Сила тяжести $g$ действует всегда и направлена вертикально вниз. В системе координат датчика её проекция зависит от углов наклона. Собственное ускорение объекта (то, которое реально вызывает изменение скорости) вычисляется как:

$$a_{\text{ист}} = a_{\text{изм}} - R \cdot g_{\text{векг}},$$

где $a_{\text{изм}}$ — измеренное акселерометром ускорение; $R$ — матрица поворота (или кватернион), полученная из данных гироскопа; $g_{\text{векг}} = [0{,}0{,}-9{,}81]$ — вектор гравитации в глобальной системе координат.

После компенсации гравитации полученный вектор собственного ускорения интегрируется численным методом, обычно методом трапеций:

$$v[n] = v[n-1] + \frac{a_{\text{ист}}[n] + a_{\text{ист}}[n-1]}{2} \Delta t$$

где $\Delta t$ — шаг дискретизации (например, 0.01 с при частоте 100 Гц).

Опираясь на данную теорию составлен код алгоритма обработки по 3-м осям, полученные результаты представлены на рис. 3.

```
Vx: 0.000    Vy: 0.000    Vz: 0.000    | Wx: -0.00 | Wy: 0.00 | Wz: -0.00 | Стоп
Vx: 0.000    Vy: 0.000    Vz: 0.000    | Wx: -0.00 | Wy: -0.00 | Wz: -0.00 | Стоп
Vx: 0.000    Vy: 0.000    Vz: 0.000    | Wx: -0.00 | Wy: -0.00 | Wz: -0.00 | Стоп
Vx: 0.002    Vy: 0.001    Vz: -0.000   | Wx: 0.00 | Wy: -0.00 | Wz: -0.00 | Стоп
Vx: 0.007    Vy: 0.002    Vz: -0.000   | Wx: 0.00 | Wy: 0.00 | Wz: -0.01 | Движение
Vx: -0.010   Vy: -0.026   Vz: -0.001   | Wx: 0.01 | Wy: 0.05 | Wz: -0.01 | Движение
Vx: -0.087   Vy: -0.089   Vz: -0.003   | Wx: 0.00 | Wy: 0.10 | Wz: -0.00 | Движение
Vx: 7.277    Vy: 9.789    Vz: 8.953    | Wx: 2.55 | Wy: -3.82 | Wz: -16.16 | Движение
Vx: 7.510    Vy: 9.492    Vz: 8.468    | Wx: 2.35 | Wy: -4.25 | Wz: -16.48 | Движение
Vx: 8.469    Vy: 9.243    Vz: 8.292    | Wx: 2.43 | Wy: -4.69 | Wz: -16.74 | Движение
Vx: 9.436    Vy: 9.455    Vz: 8.184    | Wx: 2.83 | Wy:  4.84 | Wz:  16.91 | Движение
Vx: 10.000   Vy: 10.000   Vz: 9.394    | Wx: 3.20 | Wy: -4.88 | Wz: -16.92 | Движение
Vx: 9.894    Vy: 10.000   Vz: 10.000   | Wx: 3.17 | Wy: -4.46 | Wz: -16.86 | Движение
```

*Рис. 3.* Результаты программы

**Передача данных по Bluetooth**

Для беспроводной связи разрабатываемого блока с устройством пользователя (ПК или роботом) выбран протокол Bluetooth Low Energy (BLE).

BLE [1] является энергоэффективной версией классического Bluetooth, специально разработанной для устройств с автономным питанием от аккумулятора.

Протокол обеспечивает:

1. Низкое энергопотребление — передача данных осуществляется короткими пакетами с длительными интервалами сна, что критично для работы блока от встроенного аккумулятора. Если классический Bluetooth потребляет около 1 Вт энергии, то BLE — от 0,01 до 0,25 Вт (10–250 мВт)

2. Достаточную скорость передачи — до 1–2 Мбит/с , чего вполне достаточно для передачи показаний 6-осевого IMU с частотой до 100–200 Гц.

3. Простое сопряжение — автоматическое подключение к ранее известным устройствам без необходимости ввода паролей.

Для работы с BLE выбран микроконтроллер со встроенным радиомодулем BLE - ESP32 S3.

**Структура передаваемых данных**

Структура и объем данных, формируемых микроконтроллером, представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

Размер данных, передаваемый устройством

| По | Описание | Размер |
|---|---|---|
| hea | Идентификатор начала пакета и тип | 1 |
| tim | Метка времени (мс) для синхронизации | 4 |
| vx, | Линейное перемещение (int16) | 6 |
| wx, | Угловая перемещение (int16) | 6 |
| crc | Контрольная сумма для проверки | 1 |
| Ит | | 24 байта |

Такой пакет передаётся с частотой 50–100 Гц, что обеспечивает актуальное обновление положения модели в САПР без избыточной нагрузки на радиоканал.

**Заключение**

В рамках данной статьи были рассмотрен компактный блок дистанционного управления на базе 6-осевого IMU и программируемого микроконтроллера с поддержкой BLE. Устройство предназначено для работы в САПР и управления промышленными манипуляторами и дронами. Рассмотрена теория для написания алгоритма получения данных об ориентации устройства в пространстве. Выбран протокола BLE, который обеспечивает низкое энергопотребление и достаточную для задач управления скорость передачи данных.

## Библиографический список

1. Проблемы проектирования и эксплуатации беспроводных устройств, функционирующих в нелицензируемом диапазоне ISM 2,4 ГГц и пути их решения // Беспроводные технологии. – 2006. – № 3.

2. Прохорцов А. В. Способ уменьшения погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы / А. В. Прохорцов, М. Б. Богданов, В. В. Савельев, Б. В. Сухинин, Н. Д. Гаскова // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – М.: Издание Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2009. – Вып. 2 (60). – С. 31–34.

3. Терешков В. М. Прямой метод оценивания погрешностей датчиков бесплатформенных ИНС // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – М., 2010.

4. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, 1979. – 296 с.

© Кокорышкин Ф.Р., 2026

УДК 553.53

И.А. КОРЕПАНОВ
*druidvanay@gmail.com*
Науч. руководов. – д-р техн. наук, проф. В.Х. ЯСОВЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА В ПАКЕТЕ COMSOL MULTIPHYSICS

*Аннотация.* В работе представлены результаты трёхмерного конечно-элементного моделирования магнитного поля, генерируемого системой колец Гельмгольца. Расчёты выполнены в модуле «Magnetic Fields (mf)» программы COMSOL Multiphysics 6.4. Геометрические параметры установки: радиус каждой катушки – 0,1 м, расстояние между центрами – 0,1 м, число витков – 34, питающий ток – 0,3 А. Проведено сравнение численных результатов с аналитическими выражениями, следующими из закона Био–Савара–Лапласа. Установлено, что индукция в геометрическом центре системы составляет 88,8 мкТл, что на 3,2 % ниже теоретического значения 91,7 мкТл. Построены распределения нормы магнитной индукции вдоль оси симметрии, выполнена визуализация пространственной структуры поля. Полученное расхождение не превышает 3,2 %, что подтверждает высокую достоверность модели и её пригодность для метрологических задач.

*Ключевые слова:* кольца Гельмгольца, магнитное поле, компьютерное моделирование, COMSOL Multiphysics, метод конечных элементов, однородное поле.

### Введение

Система, состоящая из двух соосных катушек одинакового радиуса, расположенных на расстоянии, равном этому радиусу, известна как кольца

Гельмгольца. Такая конфигурация позволяет создавать в центральной области между катушками магнитное поле с высокой степенью однородности [1]. Благодаря этому свойству кольца Гельмгольца широко используются для калибровки магниточувствительных датчиков (магнитометров, инклинометров), а также в научных экспериментах по изучению магнитных материалов.

Современные программные пакеты, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), например COMSOL Multiphysics, дают возможность с высокой точностью рассчитывать распределение магнитного поля с учётом реальной геометрии обмоток, их толщины и свойств материалов [2].

Цель настоящей работы – построить детальную трёхмерную модель колец Гельмгольца в среде COMSOL Multiphysics, выполнить численный расчёт индукции магнитного поля и сопоставить полученные результаты с классическими аналитическими формулами. Дополнительной задачей является оценка погрешности моделирования и определение границ зоны однородности.

**Теоретические основы**

Для одиночного тонкого витка радиусом $R$, по которому протекает ток $I$, индукция магнитного поля на оси витка на расстоянии $x$ от его центра определяется законом Био–Савара–Лапласа:

$$B_{\text{витка}} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Если катушка состоит из $N$ витков, плотно намотанных тонким проводом, и её толщина пренебрежимо мала по сравнению с радиусом, то поле такой катушки эквивалентно полю $N$ одинаковых витков, т.е. выражение (1) умножается на $N$. Для системы двух одинаковых катушек, расположенных соосно на расстоянии $R$ между центрами, индукция в произвольной точке на оси (координата $x$ отсчитывается от середины промежутка) даётся суперпозицией:

$$B_x = \frac{\mu_0 N I R^2}{2}\left[\left(R^2+\left(x+\frac{R}{2}\right)^2\right)^{-\frac{3}{2}} + \left(R^2+\left(x-\frac{R}{2}\right)^2\right)^{-\frac{3}{2}}\right]. (2)$$

В центре системы ($x = 0$) выражение упрощается:

$$B_0 = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 N I}{R}. (3)$$

Подставляя числовые значения, принятые в данной работе ($R = 0{,}1$ м, $N = 34$, $I = 0{,}3$ А), получаем теоретическую величину индукции в центре:

$$B_0^{\text{теор}} = 0{,}7155 \cdot \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 34 \cdot 0{,}3}{0{,}1} = 9{,}17 \times 10^{-5} \text{ Тл} = 91{,}7 \text{ мкТл}.$$

**Построение модели в COMSOL Multiphysics**

**Геометрия и материалы**

Моделирование выполнялось в 3D-постановке. Каждая катушка представлена в виде тора с большим радиусом (образующей окружности) $R = 0{,}1$ м и малым радиусом (сечением провода) $r = 0{,}005$ м. Центры торов расположены на оси $z$ в точках $z = -0{,}05$ м и $z = +0{,}05$ м, что обеспечивает расстояние между центрами 0,1 м – в точности равное большому радиусу. Внешняя область, моделирующая окружающий воздух, задана параллелепипедом размером $0{,}6 \times 0{,}6 \times 0{,}6$ м. На его внешних гранях установлено условие магнитной изоляции ($n \times A = 0$).

Материал катушек – медь (удельная электрическая проводимость $\sigma = 5{,}998 \times 10^7$ См/м, относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$). Остальное пространство по умолчанию считается вакуумом ($\mu_r = 1$, $\sigma = 0$).

**Физика и граничные условия**

Использован модуль Magnetic Fields (mf) стационарного решателя. Для задания токовой нагрузки на каждый тор применён узел Multi-Turn Coil с настройками:

тип катушки – Circular;

число витков – 34;

ток на один виток – 0,3 А;

направление тока – одинаковое для обеих катушек (вдоль оси $+z$).

Направление тока конкретизировалось через дочерний узел Coil Geometry, где в качестве опорного выбиралось произвольное ребро на поверхности тора, а при необходимости направление инвертировалось флажком Reverse direction.

Построение сетки выполнено методом свободной тетраэдризации. Максимальный размер элемента задан: 0,02 м – в областях, занимаемых катушками, и 0,04 м – в воздушном блоке. Общее количество элементов составило около 1,5 млн, что обеспечивает приемлемую точность при разумных вычислительных затратах.

**Результаты моделирования и их анализ**

На рис. 1 представлено сечение распределения нормы магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ в плоскости $y = 0$ (т.е. в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии). Хорошо видно, что максимальные значения (до $8{,}71 \times 10^{-5}$ Тл) достигаются вблизи проводников, а в центральной области формируется зона с почти постоянным полем.

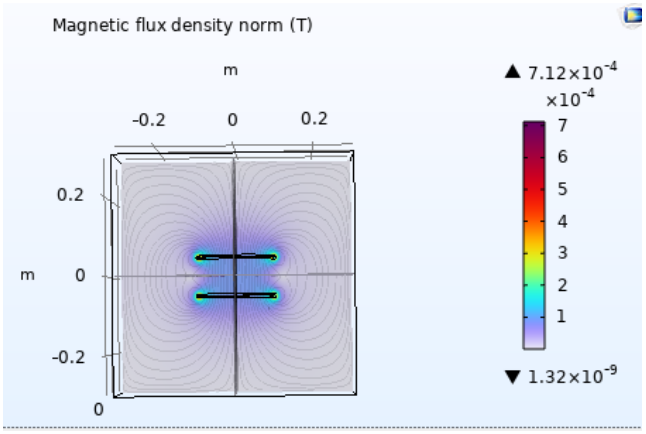



*Рис. 1.* Распределение нормы магнитной индукции в сечении y=0

Для количественного анализа вдоль оси $z$ была создана линия разреза (Cut Line) от $z = -0{,}15$ м до $z = +0{,}15$ м (шаг 0,01 м). На рис. 2 приведён график зависимости | B | от координаты $z$ (в качестве абсциссы использована длина дуги, которая в данном случае совпадает с координатой).

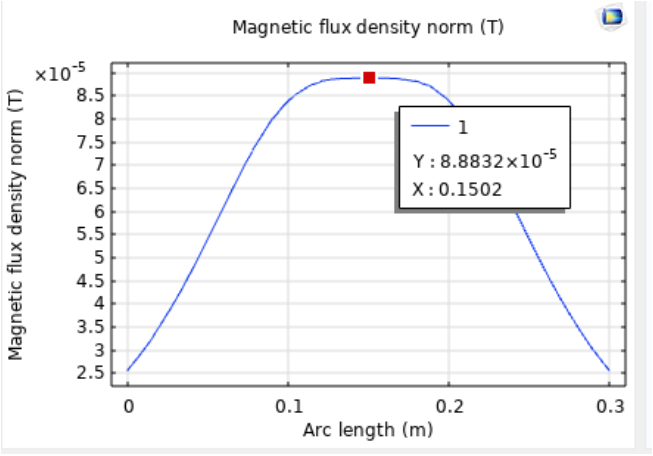



*Рис. 2.* Изменение нормы магнитной индукции вдоль оси симметрии

Значение в центре ($z = 0$) составило $8{,}88 \times 10^{-5}$ Тл = 88,8 мкТл. Сравнение с теоретическим значением 91,7 мкТл даёт относительное расхождение

$$\delta = \frac{|\,91{,}7 - 88{,}8\,|}{91{,}7} \times 100\% \approx 3{,}2\%.$$

**Обсуждение погрешности**

Полученное расхождение (3,2 %) находится в пределах погрешности, указанной в аналогичных работах. Например, в исследовании [3] для колец Гельмгольца с реальной обмоткой расхождение между МКЭ-моделью и аналитикой достигало 12 %. Основные причины отличия в нашем случае:

– конечная толщина обмотки ($r = 5$ мм), тогда как аналитическая формула (2) предполагает бесконечно тонкие витки;

– дискретизация пространства тетраэдральными элементами – всегда вносит некоторую погрешность;

– возможное микросмещение линии разреза относительно истинной геометрической оси (при смещении на 0,1 мм норма поля может измениться на десятые доли процента).

Несмотря на это, полученная точность (менее 4 %) является вполне удовлетворительной для инженерных приложений и, в частности, для калибровки магнитометров, где допустимая погрешность обычно составляет 5–10 %.

**Оценка однородности поля**

На основе полученных данных определена протяжённость зоны, в которой поле отклоняется от центрального значения не более чем на 1 %. Она составляет примерно 70 мм (от $-35$ мм до $+35$ мм). Такой размер рабочей области превышает габариты типовых магнитометров скважинных инклинометров (диаметр 30 мм, длина 28 мм) [4], что подтверждает практическую пригодность спроектированной системы.

**Заключение**

В результате выполнения работы создана достоверная трёхмерная конечно-элементная модель колец Гельмгольца в среде COMSOL Multiphysics 6.4. Параметры системы ($R = 0{,}1$ м, $N = 34$, $I = 0{,}3$ А) выбраны с учётом ограничений по току питания (не более 0,3 А) и габаритам (внешний диаметр катушек не превышает 300 мм). Сравнение численных результатов с аналитическими формулами показало расхождение всего 3,2 %, что значительно лучше типичных значений, встречающихся в литературе (до 12 %). Следовательно, построенная модель может служить основой для дальнейших исследований, включая анализ влияния несоосности катушек, экранирования и температурных эффектов, а также для метрологической поверки магнитометров в лабораторных и полевых условиях.

## Библиографический список

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Оникс 21 век, 2005.

2. Огородников А.С. Моделирование в среде MATLAB – COMSOL 3.5a. Ч. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 104 с.

3. Гормаков А.Н., Ульянов И.А. Расчёт и моделирование магнитных полей, создаваемых системой «кольца Гельмгольца – соленоид» // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 40–45.

4. Ульянов И.А. Комплекс для проверки магнитометров инклинометра: пат. 124790 Рос. Федерация / Ульянов И.А., Гормаков А.Н., Федулов А.В. ; заявитель и патентообладатель (указывается, если известен). – № 2012153281; опубл. 10.02.2013, Бюл. №4.

© Корепанов И.А., 2026

УДК 621.317.757

Б.Р. МАВЛЕМБИРДИН
*bmavlembirdin345@mail.ru*
Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент А.Л. ТИМОФЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ АЦП

*Аннотация.* Рассмотрена структура стенда для динамических испытаний быстродействующих аналого-цифровых преобразователей. В основу решений положено когерентное тактирование синтезатора частоты, испытуемого АЦП и узла захвата отсчетов от единой опорной частоты. Это сделано для того, чтобы обеспечить когерентность выборки. Описана электрическая функциональная схема устройства и принцип стробоскопического анализа.

*Ключевые слова:* аналого-цифровой преобразователь, когерентная выборка, стробоскопический анализ.

## Введение

Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей приходится контролировать на любой стадии разработки измерительной аппаратуры, систем радиоприёма и цифровой обработки сигналов. У быстродействующих АЦП этот контроль особенно неудобен. На максимальной частоте дискретизации проявляются апертурные ошибки, неполное установление внутренних узлов, динамическая нелинейность. Значит, стенд обязан выдавать чистый синусоидальный сигнал, держать стабильное тактирование и записывать длинный непрерывный массив кодов, не снижая при этом рабочей скорости преобразователя.

Среди классических динамических испытаний обычно называют четыре подхода: метод биений, гистограммный анализ, аппроксимацию синусоидой и спектральный анализ через быстрое преобразование Фурье. Все они опираются на одно и то же – спектрально чистый входной сигнал и грамотно подобранное соотношение его частоты с частотой дискретизации. В этой работе рассматривается стробоскопический анализ: частоты сигнала и дискретизации связаны точной рациональной дробью, а форма сигнала восстанавливается уже после захвата простым переупорядочиванием отсчётов.

От стенда 1990 года, предложенный вариант отличается тремя решениями. Все ключевые узлы тактируются от одного опорного генератора 65 МГц. Источником синусоиды служит готовый модуль прямого цифрового синтеза AD9910. Вся вычислительная часть переехала на персональный компьютер.

## Принцип метода и требования к стенду

Условие, на котором держится метод: частота запуска АЦП $f_{\text{зап}}$ и частота входного сигнала $f_{\text{вх}}$ связаны рациональной дробью:

$$\frac{f_{\text{зап}}}{f_{\text{вх}}} = \frac{n}{m} \qquad (1)$$

где $n$ и $m$ – взаимно простые целые числа. При таком выборе соседние отсчёты физически попадают на разные периоды синусоиды и в естественном порядке стоят неправильно – зато все вместе они полностью описывают форму одного периода. После записи массив достаточно перетасовать по модульной формуле:

$$y[k] = x[(k \cdot M_c) \bmod N], k = 0 \ldots N - 1 \quad (2)$$

где $x$ – исходный массив, $y$ – восстановленный, $N$ – число записанных отсчётов, $M_c$ – сколько периодов сигнала уместилось в окно регистрации. АЦП работает на своей паспортной частоте, а программа собирает из его кодов плотную выборку одного периода.

**Структура разработанного стенда**

Функциональная схема стенда показана на рис. 1. Блок А1 формирует опорные 65 МГц. Внутри стоят термостатированный генератор на технологии MEMS SiT5358 и буфер-распределитель LMK1C1104 с одним входом и четырьмя выходами уровня LVCMOS. Эти четыре выхода уходят на источник DDS, тактовый вход АЦП и вход HSE микроконтроллера. Что даёт единый источник вместо двух раздельных? Когерентность всей схемы. Если генератор поплывёт по температуре или со временем, обе частоты сдвинутся вместе, и условие (1) сохранится.

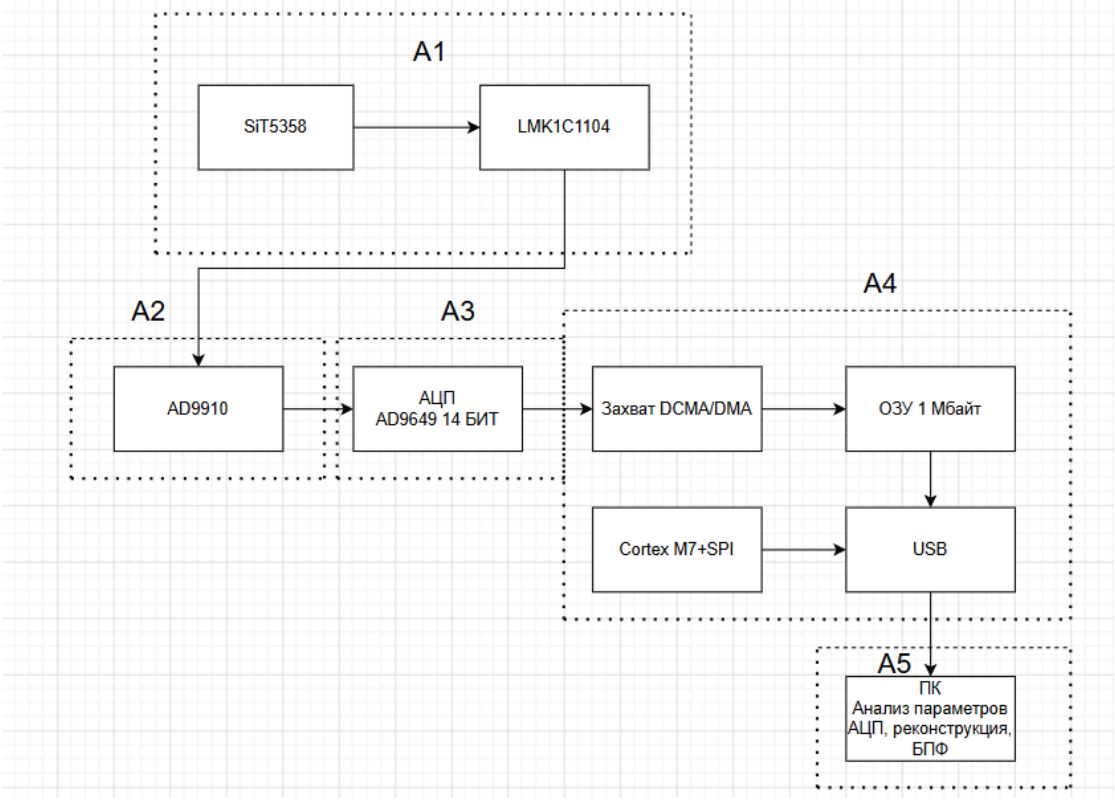



*Рис. 1.* Функциональная схема стенда

Испытательный сигнал делает блок А2 на готовой отладочной плате AD9910. Синтезатор прямого цифрового синтеза получает на вход опорные

65 МГц, а слово настройки частоты – с компьютера по USB. На выходе платы стоит синусоида $f_{вх}$ с диапазоном до 30 МГц, которая подаётся на испытуемый АЦП.

Блок А3 состоит из испытуемого АЦП, AD9649BCPZ-65, 14 бит, параллельный CMOS-выход. На его тактовый вход идёт $f_{зап}$ = 65 МГц. Динамические дефекты, ради которых стенд вообще собирается, видны именно на максимуме – ниже они либо маскируются, либо исчезают.

Узел А4 построен на микроконтроллере STM32H743VIT6. Цифровой поток с АЦП заходит через интерфейс параллельного захвата DCMI, работающий по сигналу DCO в 14-разрядном режиме, и сразу уходит в память контроллером прямого доступа DMA – ядро в этом не участвует. На полной скорости 65 Мвыб/с такая связка не теряет ни одного отсчёта. Под буфер отдано встроенное ОЗУ объёмом 1 МБ; в него входит до 524 288 отсчётов при 16-разрядном выравнивании. Готовый массив уходит на компьютер по USB FullSpeed. Параллельно интерфейс SPI занимается конфигурированием АЦП – это отдельная линия, не связанная с потоком данных.

Компьютер (А5) управляет DDS и обрабатывает измерения. По USB он отправляет в AD9910 слово настройки частоты, а от блока А4 – принимает массив исходных отсчётов. Прошивка микроконтроллера благодаря такому разделению свелась к минимуму.

**Алгоритм обработки результатов**

Программа на ПК сначала проверяет два момента: длину записи и пару $n$, $m$ на условие когерентности. Дальше по формуле (2) отсчёты выстраиваются в порядок эквивалентного времени. Восстановленный массив умножается на оконную функцию Блэкмана–Харриса и идёт через БПФ. Окно нужно ради подавления растекания спектра – даже когда условие (1) выполнено идеально, реальная пара ($n$, $m$) обычно даёт небольшую фазовую ошибку, плюс никуда не деваются слабые побочные компоненты.

По спектру считаются основные динамические параметры: отношение сигнал/шум плюс искажения (SINAD), эффективное число разрядов (ENOB), коэффициент гармонических искажений (THD) и динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR). ENOB из SINAD получается по известной формуле:

$$\mathrm{ENOB} = \frac{\mathrm{SINAD} - 1{,}76}{6{,}02} \qquad (3)$$

Кроме спектра, восстановленная временная форма пригождается для локального поиска – разрывов, пропусков кодов, участков с повышенной дифференциальной нелинейностью. То есть в одном измерении стенд закрывает сразу два подхода: метод эквивалентного времени и стандартную БПФ-оценку.

**Заключение**

Стенд позволяет проверять динамику 14-разрядного АЦП на полной паспортной частоте 65 МГц. Когерентное тактирование от одного источника закрывает вопрос с дрейфом частот, готовый модуль DDS даёт рационально связанные частоты сигнала с шагом в доли герца, а STM32H743 с DCMI/DMA сохраняет порядок отсчётов для дальнейшей обработки.

Главное упрощение по сравнению со старыми реализациями – переупорядочивание и спектральная обработка ушли на ПК. Раньше адресной арифметикой занимался отдельный аппаратный блок управления, теперь его просто нет. В дальнейшем к стенду можно добавить автоматический подбор пар ($n$, $m$) и программное формирование протокола измерений.

**Библиографический список**

1. Аминев А.М., Арсланов Т.Н., Бахтияров Г.Д., Тимофеев А.Л. Стенд для контроля динамических свойств сверхбыстродействующих АЦП (электронный ресурс) – Автометрия. 1990. № 5. С. 66–70. – URL:https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/1988/2/83-86.pdf (дата обращения 02.05.2026)

2. Dynamic Tests for A/D Converter Performance Application Report SBAA002A. (электронный ресурс) – Dallas: Texas Instruments, 2015. – URL:https://www.ti.com/lit/an/sbaa002a/sbaa002a.pdf?ts=1777906462481 (дата обращения 01.05.2026)

3. Lechner A., Richardson A. Test of A/D Converters: Converter Characteristics to Built-in Self-test Proposals. (электронный ресурс) – Lancaster: University of Lancaster, 2003. –URL: http://researchgate.net/publication/234091862_Test_of_AD_Converters#read (дата обращения 28.04.2026)

© Мавлембирдин Б.Р., 2026

УДК 62-9

Е.О. МУЛЛАХМЕТОВА
*ekaterina.m3472@gmail.com*
Науч. руковод. – ст. преподаватель Е.Ф. НУРЛЫГАЯНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА С ЧПУ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

*Аннотация*. В статье рассматривается задача повышения надежности фрезерной обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) за счёт внедрения системы контроля усилий резания. Предложена архитектура

системы на основе трёх тензодатчиков, установленных в зоне шпинделя, фиксирующего приспособления и стола и рассмотрено использование дельта-сигма АЦП для подавления вибраций.

*Ключевые слова:* фрезерный станок с ЧПУ; тензометрический датчик; система контроля параметров; износ инструмента; датчик.

***Введение***

Современное авиационное и машиностроительное производство предъявляет высокие требования к точности обработки деталей на фрезерных станках с ЧПУ. Как отмечается в работе [1], адаптивные технологии играют ключевую роль в повышении эффективности авиационного производства. Одной из главных проблем является отсутствие оперативного контроля фактических усилий резания в процессе обработки. Это приводит к повышенному износу инструмента, поломкам фрез и выпуску бракованных деталей.

Прототипом технического решения является патент № RU 2 417 140 C1, описывающий установку тензометрического датчика на резце фрезерного станка [4].

Тензометрические датчики (тензодатчики) являются одним из наиболее эффективных решений для измерения усилий резания в системах контроля фрезерных станков с ЧПУ. Их применение обусловлено рядом существенных преимуществ перед другими типами датчиков, в частности перед пьезоэлектрическими [2].

Преимущества тензометрических датчиков для систем контроля фрезерных станков с ЧПУ:

– возможность точных статических измерений. В отличие от пьезоэлектрических датчиков, которые со временем теряют точность из-за утечки заряда, тензодатчики сохраняют стабильность сигнала достаточно долго;

– простота конструкции и надежность;

– компактность и малый вес;

– малые деформации при высоких нагрузках;

– устойчивость к внешним воздействиям. Современные тензометрические датчики имеют высокий класс пыле- и влагозащиты;

– широкий диапазон измерений.

Структурная схема системы контроля.

Предлагаемая система включает следующие элементы (рис. 1):

1. Инструмент (фреза), шпиндель станка, фиксирующее устройство (тиски, приспособление);

2. 3 тензодатчика (для замера 3х осей);

3. Усилитель сигналов;

4. Фильтр нижних частот (ФНЧ);

5. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП);

6. Микроконтроллер;

7. Интерфейс связи с ЧПУ;
8. Система ЧПУ станка.

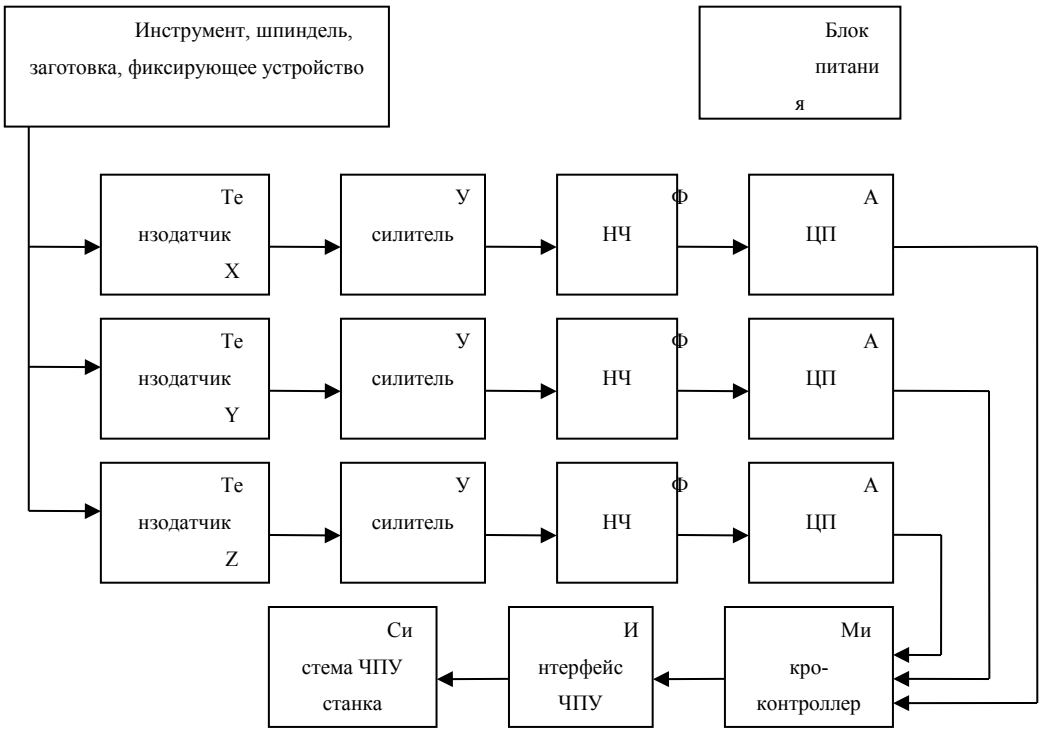



*Рис. 1*. Структурная схема системы контроля параметров фрезерного станка с ЧПУ

В схеме используется тензометрический датчик, который представляет собой прямоугольный брусок из алюминиевого сплава, с отверстием в центре. На его боковые поверхности нанесены тонкоплёночные резисторы, соединённые по мостовой схеме, поэтому резистивный датчик имеет 4 гибких вывода.

Тензометрические датчики устанавливаются:

– на корпусе шпинделя (ось Z — усилие врезания);

– на фиксирующем заготовку приспособлении (оси X, Y — боковые усилия резания);

– на столе станка (контроль крутящего момента).

Для фрезерной обработки контроль двух усилий в плоскости XY является достаточным, поскольку вращающаяся фреза, ориентированная по оси Z и создаёт сопоставимые усилия бокового резания, характеризующие износ боковых кромок. Усилие по оси Z характеризует износ торцевых кромок.

Сигналы с трёх тензодатчиков усиливаются, проходят через фильтр нижних частот (подавление вибраций) и поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Поскольку для измерения усилий резания не требуется сверхвысокая частота дискретизации, выбраны дельта-сигма АЦП с внутренним усреднение,

с частотой 10 кГц и 24-битным разрешением, обеспечивающие погрешность измерения усилий не более 0,25%. Данный выбор позволяет:

– подавить импульсные помехи;

– снизить влияние вибраций станка;

– получить высокую разрешающую способность (до 24 бит).

Одновременный анализ трёх гармонических составляющих (сигналы с трёх датчиков) для более точных и полных результатов предлагается выполнять с использованием искусственного интеллекта. Это позволяет:

1. Обучить систему распознавать рабочие и аварийные режимы.

2. Классифицировать причины выхода усилий за пределы допуска:

– Износ инструмента;

– Неверный выбор программы обработки;

– Несоответствие материала заготовки.

При больших (2000–5000 Н) усилиях резания возможно получение информации косвенно — по токам приводов подачи и шпинделя, которые оперативно измеряются системой ЧПУ станка. В этом случае установка дополнительных тензодатчиков не требуется, задача сводится к доработке программного обеспечения станка [3].

Косвенный метод имеет следующие особенности:

Преимущества:

– не требует изменения конструкции станка;

– снижает затраты на модернизацию;

– использует существующие датчики тока в приводах.

Недостатки:

– меньшая точность по сравнению с прямым измерением;

– влияние других потребителей электроэнергии;

– инерционность электроприводов.

Данный подход экономически выгоден при модернизации существующего парка оборудования, особенно для станков с большими мощностями приводов (свыше 10 кВт).

***Заключение***

В результате выполнения данной работы была разработана система контроля параметров фрезерного станка с ЧПУ на основе тензодатчиков, которая предназначена для оперативного мониторинга усилий резания в процессе обработки деталей. Также было предложено использование дельта-сигма АЦП для подавления вибраций. В ходе исследования была предложена структурная схема системы, включающая три тензометрических датчика, которые устанавливаются на корпусе шпинделя, фиксирующем приспособлении и столе станка и позволяют регистрировать усилия резания по оси Z для оценки износа торцевых кромок фрезы и сопоставимые усилия бокового резания в плоскости XY для оценки износа боковых кромок. Разработанная система может быть реализована как при создании новых станков, так и при модернизации существующего оборудования, обеспечивая

высокую точность и помехоустойчивость измерений. Для экономии и удобства модернизации был рассмотрен косвенный метод.

## Библиографический список

1. Кулик В.И., Нилов А.С. Адаптивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. – Санкт-Петербург, 2018. – 184 с.

2. Сергеев В.П. Тензометрия в машиностроении. – 2021. – 320 с.

3. Сазанов, А.А., Старовойтов С.В., Хадиуллин С.Х., Черников П.П. Методы диагностики состояния режущего инструмента в станочных системах: учебное пособие / под общ. ред. П.П. Черникова; Уфимский университет науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025.

4. Патент № RU 2 417 140 C1. Устройство контроля параметров резания / опубл. 27.04.2011. Бюл. № 12.

© Муллахметова Е.О., 2026

УДК 629.7.05

А.А. МУРЗИНА
*aidamurzina4@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Л.М. НЕУГОДНИКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ РОЯ БПЛА

*Аннотация*. В работе рассматривается задача автономной навигации роя беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Проанализированы инерциальная навигационная система, визуальная одометрия и радиомаячные системы локального позиционирования, а также их ограничения. Предложен подход к комплексированию данных на основе расширенного фильтра Калмана. Рассматриваются принципы организации навигационных вычислений и обмена данными между аппаратами. Показано, что комплексирование повышает устойчивость и управляемость роя БПЛА.

*Ключевые слова*: БПЛА, автономная навигация, ГНСС, инерциальная навигация, визуальная одометрия, радиомаячные системы, фильтр Калмана, рой БПЛА.

В настоящее время все чаще используются роевые методы управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) для задач мониторинга,

разведки, связи и поражения целей. Однако одной из основных уязвимостей таких систем является потеря сигнала с глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС). Потеря сигнала может возникать из-за применения средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), направленно подавляющих спутниковые сигналы, спуфинга (подмены координат), в лесистой местности, при плотной городской застройке или в помещении. Потеря сигнала может вызвать деградацию системы в целом, также может приводить к потере отдельных элементов роя, нарушению целостности строя и снижению отказоустойчивости [1].

Целью настоящей работы является обзор и анализ подхода к автономной навигации роя БПЛА в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе комплексирования инерциальной навигационной системы, визуальной одометрии и радиомаячных систем.

В работе рассматривается рой БПЛА, который состоит из малогабаритных летательных аппаратов. Аппараты оснащены инерциальными датчиками, камерами и средствами приема и передачи радиосигналов. Количество элементов роя может варьироваться от нескольких единиц до десятков. При том, что каждый участник роя может выполнять собственные навигационные вычисления и участвовать в обмене данными с другими аппаратами.

Одним из подходов в решении данной проблемы является комплексирование нескольких независимых навигационных подсистем, не зависящих друг от друга: инерциальные навигационные системы (ИНС), визуальная одометрия и радиомаячные системы локального позиционирования. В условиях отсутствия навигационных спутниковых сигналов особое внимание уделяется построению автономных навигационных контуров. Данные контуры должны обеспечивать устойчивую оценку координат, скорости и ориентации без внешнего влияния. Задача усложняется тем, что при движении роя необходимо поддерживать согласованное движение всех участников группировки, сохранять форму и обеспечивать оперативное взаимодействие между элементами [1, 3].

ИНС – базовый элемент навигационной системы, принцип действия которого основан на использовании акселерометров и гироскопов (MEMS-датчиков) для определения угловых скоростей и линейных ускорений с высокой частотой обновления [2]. ИНС полностью автономная система, не зависящая от внешних факторов, работа в любых условиях видимости при высокой частоте входных данных, скрытность и помехозащищенность работы. Навигационное решение формируется в режиме реального времени, что важно при выполнении скоростных маневров и полетов в целом. Однако система быстро накапливает ошибку позиционирования по причине двойного интегрирования шумов и смещений датчиков [2]. Дрейф малогабаритных MEMS-датчиков (Micro-Electro Mechanical Systems), устанавливаемых на малые БПЛА, может составлять около десятков метров за первую минуту полета [3].

Визуальная одометрия (visual odometry, VO) – метод основанный на последовательном анализе изображений, которые поступают с камеры БПЛА. Позволяет оценивать перемещение аппарата посредством сравнения и оценки особенностей изображения и ранее загруженной карты местности. В качестве исходных данных могут использоваться общедоступные снимки местности, например, из картографического архива сервиса Яндекс. Анализ производится при помощи алгоритмов машинного зрения. При необходимости возможен вариант выделения из роя нескольких БПЛА исключительно для решения задач методом VO, так как требуемые расчеты достаточно ресурсоемкие. В системах используются как монокулярные, так и стереоскопические камеры, возможно применение инфракрасных сенсоров. Данный метод обладает достаточно высокой точность на коротких интервалах, но чувствителен к условиям освещенности и текстурированности поверхности, а также к быстрым вращениям. Точность типичных систем составляет от 0,5 до 2% пройденного пути. Особо эффективны в городской среде или внутри складских помещений, цехов предприятий, где затруднена спутниковая навигация, но имеется ярко выраженная поверхность сцен [1, 2, 3, 5].

Радиомаячные системы локального позиционирования – совокупность стационарных или подвижных радиомаяков с известными координатами, относительно которых определяется положение БПЛА.

Наиболее перспективными являются системы, оснащенные UWB-приемниками (Ultra-Wideband, сверхширокополосная связь с полосой пропускания более 500МГц), псевдоспутниковые системы (наземные навигационные системы, которые излучают сигналы аналогичные ГНСС) и локальные радиометки. Система передает короткие импульсы, это позволяет повысить помехоустойчивость системы и работать в условиях отсутствия прямой видимость (NLOS). Для определения положения БПЛА относительно радиомаяков применяют несколько методов. Наиболее распространёнными являются методы определения расстояния по времени пролёта сигнала (Time of Flight, ToF), разности времени прихода сигналов (TDoA — Time Difference of Arrival), а также методы угломерных измерений (AoA — Angle of Arrival). На практике наибольшее распространение получили системы на основе технологии сверхширокополосной связи (UWB). Данная система позволяет повысить точность измерений за счёт высокой временной разрешающей способности и уменьшения влияния многолучевого распространения сигнала [3, 6, 7].

К основным преимуществам относятся высокая точность, устойчивость к помехам и способность работы в сложных условиях. Но данные системы требуют заранее установки сетей радиомаяков с известными координатами, что ограничивает мобильность, также ограниченный радиус действия [3].

Развертывание радиомаячной сети в районах, где отсутствует связь и навигационное покрытие, может происходить автономно до начала самой миссии. Первый способ: предварительная доставка и установка стационарных маяков наземными группами или отдельными БПЛА-разведчиками, которые

выполняют рассев опорных узлов в заданных точках с учетом требуемой геометрии. Второй способ: использование самих элементов роя в качестве подвижных радиомаяков, когда часть аппаратов временно выполняет функцию опорных узлов, обеспечивая локальную систему координат для остальных БПЛА. Наконец, возможна быстрая автоматизированная развертка «на лету», при которой рой формирует сеть взаимных измерений без предварительной инфраструктуры, постепенно уточняя координаты в процессе движения и накопления данных. Указанные подходы обеспечивают высокую гибкость системы и возможность полноценной автономной работы [6, 7].

Ни один из вышеописанных подходов не обеспечивает точную навигационную информацию в условиях отсутствия ГНСС. ИНС формирует непрерывную высокочастотную оценку движения роя и каждого элемента в нем, но накапливает погрешность гироскопов и акселерометров. Визуальная одометрия наоборот позволяет корректировать относительное перемещение, но чувствительна к условиям наблюдения и ограничена вычислительными мощностями. Радиомаячные системы обеспечивают привязку координат, но ограничены зоной действия и имеют низкую частоту обновления данных. Задача комплексирования заключается в согласовании этих источников информации с учетом их точностей, частот и статических характерных ошибок [10].

Использование расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filter, EKF) позволяет объединить три метода в один алгоритм управления. ИНС выступает в роли прогноза состояния, в то время как визуальная одометрия и радиомаячные измерения позволяют снижать погрешность и корректировать движение [3]. Особенностью фильтра Калмана является использование ковариационной матрицы, описывающей неопределенность текущей оценки состояния. На этапе прогноза неопределенность возрастает, так как происходит накопление ошибок, а на этапе коррекции уменьшается за счет поступления внешних наблюдений. Фильтр регулирует вклад каждого источника в итоговое решение. Более точные измерения оказывают большее влияние на итог, а шумные данные учитываются с меньшим весом.

Модификация фильтра Калмана (error-state) оценивает отклонение текущего состояния от его оценочного значения. Следовательно, повышается численная устойчивость алгоритма и учитываются малые погрешности инерциальных датчиков. При интеграции ИНС и VO формируется система visual-inertial odometry (VIO). Она обеспечивает согласование высокочастотной динамики ИНС и геометрических ограничений визуальной сцены [11].

Коррекция происходит при получении измерений от VO или радиомаяков.

– Коррекция по VO: Измерение VO представляет собой относительное смещение $\Delta p_{vo}$ и изменение ориентации $\Delta q_{vo}$ с момента предыдущего кадра. Функция измерения связывает эти относительные изменения с вектором состояния, что позволяет скорректировать позицию, скорость и смещения датчиков.

– Коррекция по радиомаякам: Измерение представляет собой псевдодальность $\rho_i$ до i-го маяка с известными координатами. Функция измерения является нелинейной, для её линеаризации используется текущая оценка положения $p_k$.

Инновационная ковариация S и коэффициент усиления Калмана K вычисляются стандартным образом. Ключевой особенностью реализации является адаптивная оценка ковариаций шумов измерений R, что повышает устойчивость фильтра в условиях деградации сенсорных данных. Для VO ковариация динамически увеличивается при обнаружении условий, ведущих к деградации точности (низкая освещённость, смаз изображения), что автоматически снижает доверие к этим данным в фильтре.

Для обеспечения отказоустойчивости всего роя описывается полностью децентрализованная архитектура без единого центра навигационных расчётов.

Локальная навигация: Каждый БПЛА в рое независимо выполняет алгоритм комплексирования (EKF) на основе данных своих собственных сенсоров (камера, IMU, UWB-приёмник).

Обмен навигационной информацией: Аппараты периодически (с частотой 1–10 Гц) обмениваются краткими пакетами данных, содержащими их текущие оценки положения pk, скорости vk и ковариацию ошибки Pk (или её упрощённую меру, например показатель точности). Обмен происходит по защищённому радиоканалу в пределах ограниченного радиуса связи (50–100 м) [5].

Согласование состояний (Consensus): для повышения общей точности и согласованности картинки роя применяется распределенный алгоритм согласования состояний. Каждый агент корректирует свою собственную оценку состояния, взвешенно усредняя её с полученными оценками соседей, учитывая доверие к ним на основе их заявленной ковариации P. Это позволяет рою коллективно подавлять индивидуальные выбросы ошибок и поддерживать согласованное групповое движение даже при временной потере связи с частью маяков или деградации VO у отдельных аппаратов [5].

Особый интерес представляет распределённое комплексирование, при котором часть вычислений выполняется непосредственно на борту каждого БПЛА, а часть – в рамках сетевого взаимодействия роя. Такая архитектура повышает отказоустойчивость системы и снижает зависимость от центрального управляющего узла.

Таким образом, комплексирование инерциальной навигационной системы, визуальной одометрии и радиомаячных измерений позволяет сформировать отказоустойчивую навигационную систему, обеспечивающую высокую точность позиционирования в условиях полного отсутствия спутниковой навигации. Для роя БПЛА данный подход является наиболее перспективным с точки зрения практического применения в сложных и помехозащищённых средах.

## Библиографический список

1. Злобин, С. Е. Развитие систем визуальной навигации для беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия GPS-сигнала // CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-sistem-vizualnoy-navigatsii-dlya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-usloviyah-otsutstviya-gps-signala

2. Разработана система автономной визуальной навигации роя дронов // Российская академия наук. – URL: https://new.ras.ru/press-center/razrabotana-sistema-avtonomnoy-vizualnoy-navigatsii-roya-dronov/

3. Обзоры по визуальной одометрии для автономных мобильных роботов. – URL: https://ics.togudv.ru/media/2024/N82_15.pdf

4. Современные методы автономной навигации. – М. : ИПУ РАН. – URL: https://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS11807.pdf

5. Жук, Р. С. Визуальная навигация автономно летящего БПЛА с целью возвращения в точку старта // Научные публикации. – URL: https://inf.grid.by/jour/article/view/1048

6. Скрыпник, О. Н. Радиомаячные системы навигации и альтернативные методы позиционирования / О. Н. Скрыпник, Е. Е. Нечаев, Р. О. Арефьев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – URL: https://www.sevsu.ru/upload/iblock/fec/rqnh5sjifvzt6lqd27p97kkrajid46tf/СВЧ-техн_1_2_2020.pdf

7. Ученые НИУ «МЭИ» разработали радиосистему навигации для беспилотников. – URL: https://zoom.cnews.ru/news/item/594084

8. Суркова, А. Д. Система посадки беспилотного аппарата на подвижную платформу с использованием радиомаяков / А. Д. Суркова, А. Л. Масленников, С. Чжан // Академические чтения по космонавтике. – М., 2023.

9. Woodman, O. J. An introduction to inertial navigation. – Cambridge : University of Cambridge, 2007.

10. Обзор методов автономной навигации БПЛА // Международный открытый журнал информационных технологий. – URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=564

11. Овакимян, Д. А. Методы навигации беспилотных летательных аппаратов / Д. А. Овакимян и др. // Труды МАИ. – URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/1f4/8vl68gn5a1ha6asxl77p1d5t0hssgu0x/13_Ovakimyan-i-dr..pdf

© Мурзина А.А., 2026

УДК 621.391

А.Д. ПАНЧЕНКО
*sanchez_ad@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А.Л. ТИМОФЕЕВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ПАМЯТИ ДЛЯ БОРТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ СПУТНИКА

*Аннотация.* В работе представлены результаты экспериментального исследования четырёх методов коррекции ошибок памяти: ECC (код Хэмминга), Chipkill, SDDC и Extended ECC на языке Python. Исследование проведено методом программной эмуляции радиационных сбоев с учётом четырёх уровней радиационной нагрузки: от спокойного Солнца до экстремальной геомагнитной бури. Для каждого метода оценивались два параметра: эффективность исправления ошибок и время обработки фиксированного объёма данных, что позволяет косвенно судить об энергопотреблении. На основе полученных данных предложена адаптивная стратегия работы тестового компьютера, переключающая методы коррекции в зависимости от текущего уровня радиации. Результаты показывают, что гибридный подход обеспечивает оптимальный баланс между надёжностью и энергоэффективностью.

*Ключевые слова*: коррекция ошибок памяти, ECC, Chipkill, SDDC, Extended ECC, радиационные сбои, программная эмуляция, Python, отказоустойчивость, бортовой компьютер, космический аппарат, адаптивные системы.

## Введение

Современные космические аппараты функционируют в условиях постоянного воздействия дестабилизирующих факторов, среди которых наиболее опасным является ионизирующее излучение. Галактические космические лучи и солнечные частицы вызывают одиночные (SEU) и множественные (MBU) сбои в запоминающих устройствах, что может привести к потере данных или некорректной работе бортового компьютера. Согласно статистике NASA и ESA, до 40% отказов космических систем связано с ошибками в памяти и программном обеспечении [1, 2].

В предыдущих работах была предложена архитектура тестового компьютера для мониторинга и восстановления основного бортового компьютера спутника и были рассмотрены существующие технологии коррекции ошибок памяти (Chipkill, Extended ECC, Chipspare, SDDC) [3,4].

Следовательно, целью данной работы является экспериментальное сравнение эффективности и временных затрат вышеперечисленных методов при разных уровнях радиационной нагрузки, а также разработка рекомендаций по их адаптивному применению в составе архитектуры с тестовым компьютером.

**Постановка эксперимента**

Эксперимент выполнен методом программной эмуляции радиационных сбоев. Тестовый набор данных включал 500 случайных 16-битных слов. Для имитации различных сценариев космической погоды использовались четыре уровня радиации с возрастающей интенсивностью: низкий (спокойное Солнце, 1% вероятность сбоя, максимум 1 ошибка на слово), средний (повышенная активность, 5%, до 2 ошибок), высокий (солнечная вспышка, 15%, до 4 ошибок) и экстремальный (геомагнитная буря, 30%, до 6 ошибок).

Сравнивались четыре метода:

1. ECC (код Хэмминга) с исправлением одной ошибки, обнаруживает две ошибки;
2. Chipkill (IBM) с исправлением двух ошибок или отказ чипа;
3. Extended ECC (Sun Microsystems) с исправлением 3 ошибок (но обнаруживает до 8);
4. SDDC (Intel), в котором двойное резервирование и исправление одной ошибки, обнаруживает две ошибки.

Для каждого метода и уровня радиации оценивались два параметра: эффективность исправления (процент тестовых слов, в которых ошибка была успешно устранена) и время обработки (суммарное время в миллисекундах, затраченное на проверку и коррекцию массива из 500 слов). Последний параметр служит косвенной оценкой энергопотребления: увеличение времени обработки указывает на рост вычислительных затрат.

Программная часть эксперимента реализована на языке Python. Оценка временных затрат проводилась с применением стандартного модуля time.

**Результаты эксперимента**

В ходе эксперимента было проведено 16 серий тестов: 4 метода коррекции и 4 уровня радиации. Каждая серия включала обработку 500 случайных 16-битных слов с программным внесением ошибок, соответствующей заданному уровню радиации. Полученные результаты приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что при низком уровне радиации (спокойное Солнце) все методы демонстрируют близкую к 100% эффективность, поскольку доминируют одиночные сбои, которые успешно исправляются любым из методов. При повышении радиационной нагрузки эффективность простого ECC и SDDC резко падает, где уже при высоком уровне радиации они исправляют менее 50% ошибок. Это объясняется тем, что множественные сбои (MBU с 2-4 ошибками на слово) не могут быть исправлены методами, рассчитанными только на одиночные ошибки.

*Таблица 1*

Сравнительная эффективность методов коррекции ошибок

| Метод коррекции | Уровень радиации | Обнаружено, % | Исправлено, % | Время, мс |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ECC | Низкий | 100,0 | 100,0 | 12,34 |
| | Средний | 98,5 | 95,2 | 12,56 |
| | Высокий | 92,3 | 45,8 | 12,68 |
| | Экстремальный | 85,1 | 28,4 | 12,71 |
| Chipkill | Низкий | 100,0 | 100,0 | 18,72 |
| | Средний | 99,8 | 98,9 | 18,95 |
| | Высокий | 96,2 | 92,4 | 19,15 |
| | Экстремальный | 89,5 | 81,3 | 19,32 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| SDDC (Intel) | Низкий | 100,0 | 100,0 | 15,45 |
| | Средний | 98,9 | 96,1 | 15,62 |
| | Высокий | 93,5 | 51,2 | 15,78 |
| | Экстремальный | 87,2 | 32,5 | 15,85 |
| Extended ECC | Низкий | 100,0 | 100,0 | 45,21 |
| | Средний | 100,0 | 99,7 | 45,56 |
| | Высокий | 98,8 | 96,5 | 45,89 |
| | Экстремальный | 96,3 | 91,6 | 46,12 |

Также видно, что Chipkill и Extended ECC сохраняют высокую эффективность даже при экстремальной радиации (81-92% исправления), поскольку их алгоритмы изначально ориентированы на множественные ошибки. Extended ECC показывает наилучшую надёжность при экстремальных условиях (91,6% исправления), но ценой значительно большего времени обработки (46,12 м/с).

По временным затратам можно подвести итог, что ECC – самый быстрый метод (12,3-12,7 мс на 500 слов). SDDC занимает промежуточное положение (15,4-15,9 мс). Chipkill требует на 30-40% больше времени (18,7-19,3 мс). Extended ECC – самый медленный, его время в 3-4 раза превышает время простого ECC (45,2-46,1 мс). Поскольку время работы коррелирует с энергопотреблением, Extended ECC наименее экономичен.

**Адаптивная стратегия работы тестового компьютера на борту спутника**

На основе полученных результатов предлагается адаптивная стратегия работы тестового компьютера на борту спутника:

1. При низком уровне радиации используется метод ECC, так как у него оптимальный баланс надёжности и энергоэффективности;

2. При среднем уровне радиации используется метод Chipkill, так как он самый быстрый и мало потребляет электроэнергии;

3. При высоком и экстремальном уровне радиации используется метод Extended ECC, так как он максимально надежен и энергозатраты оправданы

Реализация данной стратегии заключается в непрерывном мониторинге радиационной обстановки тестовым компьютером (посредством бортовых датчиков или прогностических моделей), который при превышении пороговых значений уровня радиации тестовый компьютер подаст команду основному компьютеру на переключение метода коррекции в режиме «горячей замены», что обеспечит адаптацию системы без прерывания вычислительного процесса. Преимущества предложенного гибридного подхода для борта спутника заключается в надежности, экономии энергии и адаптивности.

**Заключение**

В ходе экспериментального исследования было количественно подтверждено, что при высоком уровне радиации эффективность простого ECC падает до 45,8% исправления, в то время как Chipkill сохраняет 92,4%, а Extended ECC – 96,5%. Также было установлено, что временные затраты методов различаются в 3-4 раза: от 12,3 мс (простой ECC) до 46,1 мс (Extended ECC) на обработку 500 слов памяти.

Была разработана адаптивная стратегия переключения методов коррекции в зависимости от уровня радиации, которая может быть реализована в составе архитектуре тестового компьютера на борту спутника.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при проектировании отказоустойчивых бортовых вычислительных комплексов космических аппаратов. Предложенный гибридный подход позволяет повысить надёжность хранения данных без неоправданного увеличения энергопотребления.

В качестве перспектив рассматривается перенос разработанного решения в системы онлайн-симуляции ПЛИС для верификации методов защиты в условиях аппаратно-эмулируемых сбоев.

**Библиографический список**

1. Главная страница APPEL URL: https://appel.nasa.gov/2008/09/01/success-failure-and-nasa-culture/ (Дата обращения: 29.04.26).

2. Статистика космической среды URL: https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/ (Дата обращения: 29.04.26).

3. Панченко, А. Д. Продление срока активного использования спутника с помощью тестового компьютера на борту / А. Д. Панченко // Мавлютовские чтения: Материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 25–29 ноября 2024 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 79-82.

4. Панченко, А. Д. Эффективные технологии коррекции ошибок памяти для бортового компьютера спутника / А. Д. Панченко // Молодежный Вестник УГАТУ. Уфа: УУНиТ, 2025. – № 1 (32). – С. 77-81.

© Панченко А.Д., 2026

## СЕКЦИЯ 3.3 БИОМЕДИЦИНСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

УДК 796.015:616.1-053.6

Я.Р. АБЗАЛИЛОВА
*yana.abzalilova@bk.ru*
Науч. руководов. – Старший преподаватель кафедры физической культуры и оздоровительных технологий А.Ю. МИХАЙЛОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ВЛИЯНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТУЮ СИСТЕМУ СТУДЕНТОВ

*Аннотация*. В статье приведены результаты эксперимента: как 8-недельная программа аэробных тренировок повлияла на функциональные показатели сердечно-сосудистой системы студентов. Выявили достоверное улучшение спектральных показателей вариабельности сердечного ритма и снижение тонуса симпатического отдела вегетативной нервной системы — и всё это в экспериментальной группе.

*Ключевые слова*: физические нагрузки, сердечно-сосудистая система, студенты, вариабельность сердечного ритма, аэробные тренировки, вегетативная нервная система, адаптационные резервы, парасимпатический тонус, симпатикотония, гиподинамия, спектральный анализ, кардиореспираторная система, функциональное состояние, артериальное давление.

В современном мире всё чаще ищут эффективные способы поддержания здоровья. Особенно это касается молодёжи, и в первую очередь — студентов вузов [1]. Интенсификация учёбы, сидячий образ жизни, нехватка внимания к физкультуре, сбитые режимы труда и отдыха — знакомая картина? Всё это ведёт к быстрой утомляемости и хронической усталости. Возникает та самая острая проблема гиподинамии [1]. А она, в свою очередь, способна привести к болезням сердца, сосудов, опорно-двигательного аппарата и к замедлению метаболизма [1].

Сердечно-сосудистая система реагирует на изменение двигательного режима одной из первых. Что немаловажно, тут особый интерес вызывает вариабельность сердечного ритма (ВСР). Это метод, который позволяет оценить, как балансируют симпатическое и парасимпатическое звенья вегетативной регуляции. При оценке показателей ВСР учитывают общую мощность волн (TP), а в её составе — мощность волн высокой частоты (HF), которые характеризуют активность парасимпатики; мощность волн низкой частоты (LF) — показатель активности симпатики; и мощность волн очень низкой частоты (VLF), отражающую гуморально-метаболические влияния на

модуляцию сердечного ритма [1]. А по вагосимпатическому индексу (LF/HF) судят о симпато-парасимпатическом балансе тонуса отделов вегетативной нервной системы [1].

Цель работы — изучить, как 8-недельная программа регулярных аэробных нагрузок влияет на функциональные показатели сердечно-сосудистой системы студентов.

В исследовании поучаствовали 60 студентов: 30 юношей и 30 девушек. Возраст — 18–22 года, медицинских противопоказаний к физкультуре нет. Их разделили на две группы. Экспериментальная (40 человек) выполняла программу аэробных тренировок. Контрольная (20 человек) жила с привычным уровнем активности. Всё проходило в течение осеннего семестра.

Что делала экспериментальная группа? Восемь недель — бег трусцой и интервальные аэробные нагрузки, три раза в неделю по 40–50 минут. Интенсивность контролировали по пульсу: 60–75% от максимальной возрастной ЧСС.

Замеряли показатели дважды: до начала и спустя 8 недель. Регистрировали ЧСС в покое (после 10 минут отдыха сидя), систолическое и диастолическое артериальное давление (САД и ДАД). Анализировали вариабельность сердечного ритма по спектральным показателям: TP, HF, LF, VLF и индекс LF/HF. Для оценки функциональной реактивности использовали пробу Руфье.

Статистику обрабатывали в программе StatTech. Достоверность различий проверяли t-критерием Стьюдента (для связанных и несвязанных выборок). Различия считали значимыми при $p<0,05$.

До эксперимента исходные показатели в группах значимо не различались ($p>0,05$). Анализ вегетативного статуса показал интересную картину: у 45% участников была симпатикотония (активнее симпатический отдел), у 35% — нормотония, у 20% — ваготония [1].

А вот что случилось после 8 недель тренировок в экспериментальной группе. У студентов с исходной симпатикотонией общая мощность волн (TP) выросла с 1776 мс² до 13372 мс² ($p<0,05$).

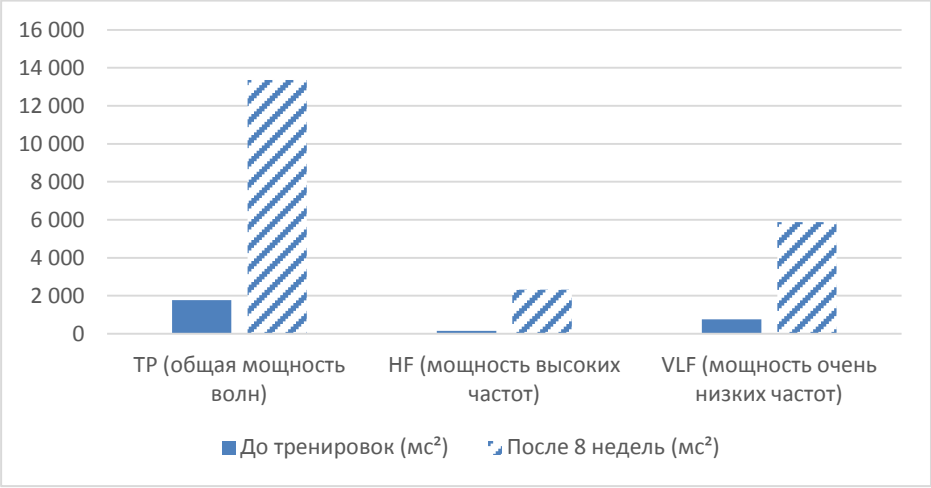



*Рис1.* Динамика спектральных показателей вариабельности сердечного ритма у студентов с исходной симпатикотонией (до и после 8 недель тренировок)

Согласитесь, скачок серьёзный — он указывает на заметное улучшение адаптационных способностей организма [1]. Дальше — больше. Мощность дыхательных волн (HF), которые связаны с парасимпатической активностью, у этих же студентов увеличилась с 162 мс² до 2333 мс² ($p<0,05$). Это прямо подтверждает: симпатическая активность снизилась, а вагусный тонус вырос [1].

И ещё один важный момент. У той же группы статистически значимо выросла мощность волн очень низкой частоты (VLF) — с 765 мс² до 5892 мс² ($p<0,05$). То есть регулярные тренировки усилили гуморально-метаболическую регуляцию сердечного ритма [1].

Посмотрим на группу с исходной нормотонией. Тут общая мощность волн увеличилась с 9368 мс² до 11501 мс². Изменение не достигло статистической значимости ($p=0,077$), но всё же указывает на потенциальное усиление адаптационных реакций сердечно-сосудистой системы [1]. А у ваготоников TP снизилась с 12717 мс² до 10726 мс². Возможно, это временное снижение вегетативной реактивности в процессе привыкания к нагрузкам [1].

Что касается артериального давления и пульса в покое. В экспериментальной группе после 8 недель ЧСС снизилась в среднем на 8–10 ударов в минуту. Систолическое давление упало на 5–7 мм рт.ст., диастолическое — на 4–6 мм рт.ст. Эти цифры хорошо согласуются с данными других исследований: при нагрузках в первой зоне мощности (аэробный режим) растёт активность блуждающего нерва, снижается напряжение регуляторных механизмов, а работа миокарда становится экономичнее [2].

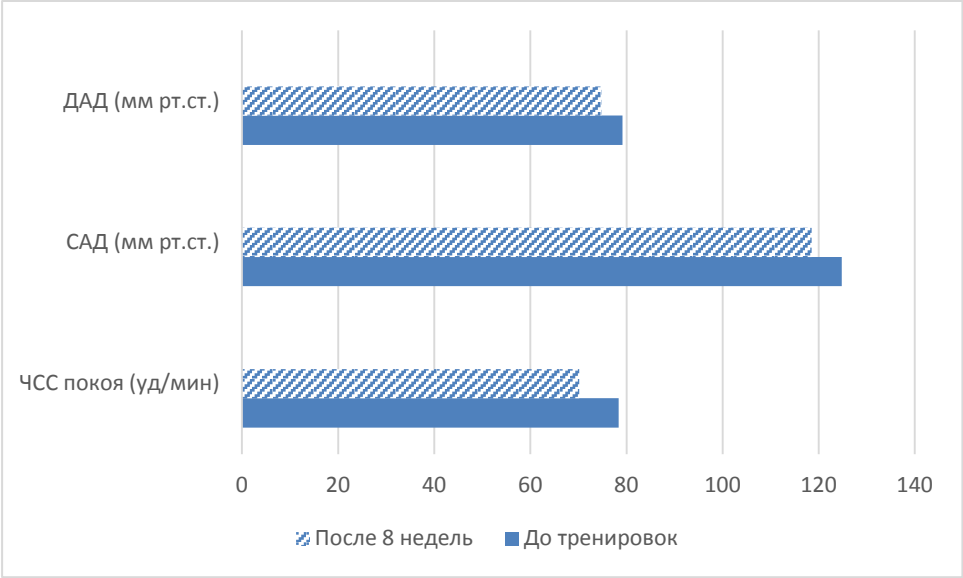



*Рис2*. Снижение артериального давления и ЧСС в покое после 8 недель аэробных тренировок

Проба Руфье показала улучшение восстановительных процессов. Время восстановления ЧСС после стандартной нагрузки сократилось в среднем на 15–20%. А это — рост кардиореспираторной выносливости [3]. Получается,

регулярная физкультура не только увеличивает скорость моторных реакций, но и ускоряет восстановление после нагрузки [3].

В контрольной группе за тот же период никаких достоверных изменений не произошло ($p>0,05$).

Итак, гипотеза подтвердилась: регулярные аэробные нагрузки положительно влияют на сердечно-сосудистую систему студентов. Причём самый выраженный эффект — у тех, у кого изначально была симпатикотония. Что вполне логично: регулярная физическая активность способна оптимизировать работу сердечно-сосудистой системы и корректировать вегетативный дисбаланс [1].

В чём здесь механизм? Происходит перестройка вегетативной регуляции: снижается активность симпатики и усиливается парасимпатическое влияние на сердечный ритм. Об этом говорит достоверный рост высокочастотного компонента (HF) и снижение индекса LF/HF у тренирующихся [1][4]. Такие изменения — классический признак долговременной адаптации к систематическим мышечным тренировкам. И они сопровождаются экономизацией работы сердца и сосудов в покое плюс ростом функциональных резервов.

Важно вот что: положительная динамика проявилась уже через 8 недель, при всего трёх занятиях в неделю. Исследования подтверждают: нагрузка в первой зоне мощности (аэробный режим) повышает тонус блуждающего нерва и снижает напряжение регуляторных механизмов [2]. А это напрямую работает на практику — для организации физкультуры в вузе выводы очень полезные.

Конечно, у работы есть ограничение: мы не отслеживали долгосрочные эффекты (больше 8 недель). В будущем стоило бы изучить, как разные режимы тренировок влияют на спектральные показатели ВСР у студентов с разным исходным типом вегетативной регуляции.

Восемь недель регулярных аэробных нагрузок (три раза в неделю по 40–50 минут) достоверно улучшают состояние сердечно-сосудистой системы студентов. Особенно — у тех, кто стартовал с симпатикотонией.

Под влиянием тренировок в экспериментальной группе значимо выросли общая мощность волн (TP) и высокочастотный компонент (HF) спектра вариабельности сердечного ритма. А это прямое свидетельство: симпатическая активность снижается, а парасимпатическое влияние на сердце усиливается.

Итог простой: регулярная физическая активность студентов — не прихоть, а эффективная профилактика сердечно-сосудистых нарушений, связанных с гиподинамией. Полученные результаты ещё раз подтверждают: аэробные программы стоит активнее внедрять в практику вузовской физкультуры.

## Библиографический список

1. Рудакова А.А., Лобжанидзе А.Х., Свиридкин П.А., Губина О.И.,

2. Комиссарова О.В., Хатуаев Р.О. Динамика спектральных показателей вариабельности сердечного ритма у студентов медицинского университета при занятиях скандинавской ходьбой // Молодежный инновационный вестник. – 2025. – Т.14, № S1. – С. 113-118.

3. Рябцев С.М., Жмурова Т.А. Особенности адаптивных реакций сердечно

сосудистой системы организма студентов в условиях аэробных нагрузок различной мощности // Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки». – 2024. – № 2 (54). – С. 69-80. DOI: 10.25688/2076-9091.2024.54.2.06

4. Милованова К.Г., Киселева С.М., Гужов Ф.А., Ильин А.А., Капилевич Л.В.

Психофизиологические показатели у студентов в условиях когнитивной деятельности на фоне фиджитал-активности // Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки». – 2025. – № 4 (60). – С. 88-99. DOI: 10.24412/2076-9091-2025-460-88-99

5. Петрожак О.Л., Стовба И.Р., Столярова Н.В., Савиных Е.Ю.

Функциональные пробы сердечно-сосудистой системы и механизмы регуляции кровообращения у студенток // Теория и практика физической культуры. – 2021. – № 3. – С. 24-27.

© Абзалилова Я.Р., 2026

УДК 616.12-008.318-089.843

Г.Т. АЮПОВ
*gamzatayupov@mail.ru*
Науч. руководитель – старший преподаватель Г.Т. ГАРИПОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## СТРУКТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВНЕШНЕГО (НАРУЖНОГО) ДЕФИБРИЛЛЯТОРА

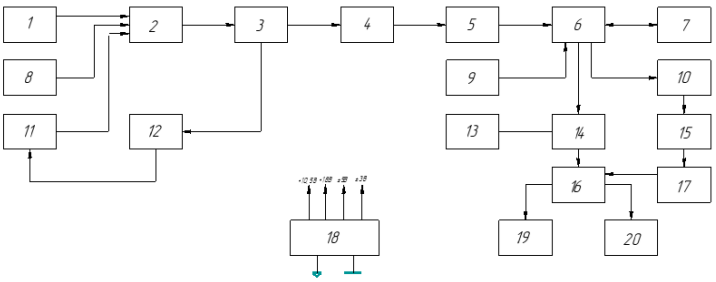
*Аннотация.* В данной статье рассматривается внутренняя структура автоматического внешнего дефибриллятора, принцип работы самого прибора, техника безопасности при работе с прибором, а также перспектива разработки и улучшения автоматических внешних дефибрилляторов.

*Ключевые слова:* дефибриллятор, внезапная сердечная смертность, сердечно-легочная реанимация, структура, техника безопасности.

Одним из ключевых методов оказания помощи при остановке сердца является дефибрилляция, которая позволяет восстановить нормальный ритм сердца с помощью электрического разряда. Для проведения дефибрилляции необходим сам прибор, в нашем случае автоматический внешний дефибриллятор.

Дефибриллятор предназначен для воздействия одиночным кратковременным электрическим импульсом через грудную клетку, который применяется для ликвидации угрожающей жизни фибрилляции сердца (разрозненных сокращений волокон миокарда) и других видов аритмий. Дефибрилляция является одним из важнейших элементов реанимации, целью которой являются устранение разрозненных, хаотичных сокращений отдельных мышечных пучков (фибрилл), восстановление эффективной сократительной деятельности желудочков сердца и выведение больного из состояния клинической смерти.

Разработка электрической структурной схемы автоматического внешнего дефибриллятора. Спроектированная электрическая структурная схема прибора представлена на рис 1.




| № | Обозначение |
|---|---|
| 1 | Электрод 1 ЭКГ |
| 2 | Блок защиты от импульса дефибрилляции |
| 3 | Дифференциальный усилитель |
| 4 | Фильтр высоких частот |
| 5 | Выходной усилитель |
| 6 | Блок управления |
| 7 | Интерфейс |
| 8 | Электрод 2 ЭКГ |
| 9 | Клавиатура |
| 10 | Регулируемый двухтактный преобразователь напряжения |
| 11 | Электрод 3 ЭКГ |
| 12 | Блок подавления синфазной помехи |
| 13 | Индикатор аварии |
| 14 | Блок управления высоковольтным ключом |
| 15 | Выпрямитель |
| 16 | Высоковольтный ключ |
| 17 | Фильтр |
| 18 | Блок питания |
| 19 | Электрод 1 дефибрилляции |
| 20 | Электрод 2 дефибрилляции |

*Рис.1.* Электрическая структурная схема автоматического внешнего дефибриллятора

Принцип работы электрической структурной схемы. Основой устройства является микроконтроллер, который осуществляет управление всем процессом через принцип широтно-импульсной модуляции. Он контролирует переключение транзисторов регулируемого преобразователя, который преобразует напряжение для достижения необходимых уровней энергии дефибрилляции. К вторичной обмотке трансформатора регулируемого преобразователя подключен выпрямитель с емкостным фильтром. Такая схема позволяет получить сигнал любой формы. Высоковольтный ключ, управляемый микроконтроллером, предназначен для передачи мощности через электроды, установленные на груди пациента. Эти электроды обеспечивают контакт с кожей и позволяют эффективно передавать дефибрилляционный импульс.

Сигнальная цепочка может быть значительно упрощена при использовании микроконтроллера, который позволяет заменить АЦП и вычислительный блок одной интегральной микросхемой. Для схемы аналогового входа применяется традиционное для подобных систем решение инструментальный усилитель и операционный усилитель обратной связи, выход которого подключен к правой ноге пациента.

В разрабатываемом устройстве биопотенциалы, снимаемые с поверхности тела человека с помощью трех отведений, поступают на цепь усилителей. Блок защиты от импульса дефибрилляции устанавливается на входе усилителя. Он служит для ограничения входных потенциалов до уровня 5 В. В дифференциальном усилителе происходит согласование с источником сигнала. Блок подавления синфазной помехи подает на правую ногу пациента напряжение, компенсирующее синфазную составляющую сигнала. После этого сигнал поступает на фильтр высоких частот и на выходной усилитель. Далее поступает на микроконтроллер и обрабатывается на АЦП.

Для возможности программного обновления и настройки устройства из внешних источников, таких как персональные компьютеры, дефибриллятор оборудован интерфейсом USB. Этот интерфейс обеспечивает высокоскоростную передачу данных и позволяет легко подключаться к компьютеру.

Дефибриллятор также оснащен дисплеем, на который выводится вся необходимая информация о состоянии устройства и пациенте в реальном времени. Дисплей позволяет медицинскому персоналу наблюдать за текущими параметрами, такими как уровень заряда аккумулятора, готовность устройства к работе, а также состояние биопотенциалов, регистрируемых с поверхности тела пациента.

На экране отображается информация о процедуре дефибрилляции, включая амплитуду и форму электрического импульса, который будет передан на пациента. В случае обнаружения сердечной аритмии, дисплей может отображать графическую интерпретацию сердечного ритма, что позволяет врачам быстро оценить состояние пациента и принимать необходимые решения.

Разработка электрической принципиальной схемы автоматического внешнего дефибриллятора. Спроектированная электрическая принципиальная схема прибора представлена на рис. 2.

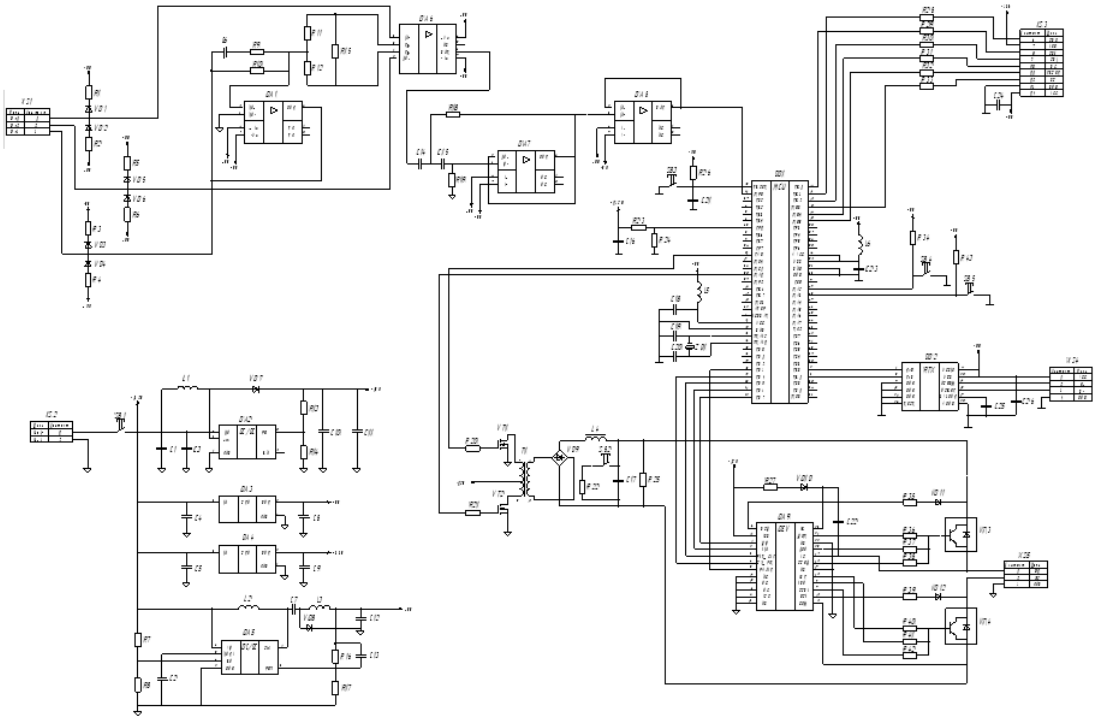


*Рис. 2.* Электрическая принципиальная схема автоматического внешнего дефибриллятора

Принцип работы электрической принципиальной схемы. Сигнал с электродов ЭКГ 1–3 подключается к разъёму XS1 и далее подается на блок защиты от импульса дефибрилляции (БЗИД), который выполняется путём двухстороннего диодного ограничения исходно запертыми диодами VD1–VD6, в качестве которых были выбраны диоды 2CL76.

Далее сигнал блока защиты от 1 и 2 электрода подаётся на входы инструментального усилителя DA6, выполненного на операционном усилителе AD620ARZ-REEL7. Сигнал с 3 электрода с выхода БЗИД подаётся на схему обратной связи, предназначенную для подавления синфазного сигнала (БПСП), выполненную на операционном усилителе DA1 OP97FPZ. Эта схема подаёт на правую ногу пациента напряжение, компенсирующее синфазную составляющую сигнала с целью устранить влияние синфазного сигнала.

Сигнал с выхода усилителя DA6 подаётся на вход фильтра высоких частот, выполненного на основе фильтра Баттерворта. Фильтр построен на основе операционного усилителя DA7 (OP97FPZ), который позволяет подавлять высокочастотный сигнал, влияющий на выходной сигнал.

После фильтра DA7 сигнал подаётся на вход выходного усилителя DA8, представляющего собой повторитель напряжения на операционном усилителе OP97FPZ. Выходной усилитель необходим для согласования сопротивлений. Повторитель напряжения обладает очень высоким входным сопротивлением и очень низким выходным. Это позволяет подключать его между источником сигнала с высоким выходным сопротивлением и нагрузкой с низким сопротивлением, чтобы исключить влияние нагрузки на источник.

Сигнал с выхода повторителя напряжения DA8 подаётся на вход аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера. Микроконтроллер является основным считывающим и обрабатывающим устройством. В качестве микроконтроллера DD1 была выбрана микросхема ATmega169PA. Микросхема представляет собой 8-разрядный микроконтроллер семейства AVR с 16 Кб Flash-памяти, 1 Кб SRAM, 512 байт EEPROM, поддерживающий работу на тактовой частоте до 16 МГц и обладающий множеством периферийных интерфейсов, включая 8-канальный 10-битный АЦП, таймеры и интерфейсы связи SPI, I2C и USART.

Так как микроконтроллер не оснащён USB-интерфейсом, для его подключения к USB-портам современных компьютеров используется микросхема DD2 – FT232, которая выполняет функцию преобразователя USB в UART, обеспечивая надёжную последовательную связь между устройством и ПК. FT232 – это USB-UART преобразователь, разработанный компанией FTDI, который обеспечивает связь между устройствами с последовательным интерфейсом и USB-портами, позволяя производить обмен данными с максимальной скоростью до 3 Мбит/с. Он содержит встроенную EEPROM для хранения пользовательских настроек и поддерживает низкое энергопотребление, подходит для портативных приложений и доступен в различных корпусах. Подключение FT232 к микроконтроллеру осуществляется через VCC и GND для питания, а также через TXD и RXD для передачи и приёма данных, что позволяет осуществлять надёжное соединение между устройствами и компьютерами, что особенно полезно для программистов и инженеров при разработке и тестировании встраиваемых систем.

Регулируемый двухтактный преобразователь напряжения (РДНП) выполнен на транзисторах VT1, VT2. В качестве транзисторов был выбран транзистор IRF150P220. В коллекторную цепь транзистора включён трансформатор T1 ТВС-70П3, ко вторичной обмотке трансформатора подключён выпрямитель на диодах VD9 с ёмкостным фильтром L4C17. Регулируемый двухтактный преобразователь напряжения работает по принципу поочерёдного переключения двух транзисторов, на которые подаётся управляющий ШИМ-сигнал. Когда один транзистор открыт, ток протекает через одну половину первичной обмотки трансформатора, создавая магнитное поле и индуцируя напряжение во вторичной обмотке, которое после выпрямления диодом и сглаживания конденсатором поступает на выход. Затем второй транзистор открывается, а первый закрывается, и ток начинает протекать через другую половину первичной обмотки в обратном направлении, снова передавая энергию во вторичную цепь. Такое поочерёдное переключение обеспечивает эффективную передачу мощности и позволяет регулировать выходное напряжение за счёт изменения скважности.

С выхода РДНП напряжение через силовые высоковольтные ключи VT3 и VT4 подаётся на электроды дефибриллятора. В качестве ключей был выбран IGBT-модуль M10 – нижний ключ представляет собой последовательно соединённые IGBT-транзистор, зашунтированный обратным

быстровосстанавливающимся диодом, и последовательно включённый быстровосстанавливающийся диод (общий коллектор-анод).

Для управления двумя мощными IGBT-транзисторами в полумостовом включении подключен драйвер DA9 – IR2114SSPbF. IR2114SSPbF – это двухканальный драйвер мощных транзисторов (MOSFET и IGBT) с гальванической развязкой и встроенными защитами, предназначенный для управления инверторами и силовыми схемами. Драйвер работает, получая управляющие сигналы для верхних и нижних транзисторов, преобразует их в управляющие сигналы с высокой скоростью переключения, обеспечивая гальваническую развязку и защиту, чтобы эффективно и безопасно управлять силовыми ключами в схеме.

Для отображения основных параметров дефибриллятора использован дисплей ILI9341, на который выводится текущая информация о рабочих характеристиках и состоянии устройства. ILI9341 – это TFT-дисплей, который по интерфейсу SPI или параллельному подключению получает команды и данные от микроконтроллера, отображая изображение, управляемое программой. Дисплей подключается к устройству через разъём XS3.

Для питания портативного дефибриллятора используется серийно выпускаемый аккумулятор PRIMEDIC AkuPak+ . Номинальное напряжение АКБ составляет 13,2 В. Так как напряжения питания микросхем составляют +12 В, +5 В и +3,3 В, необходимо привести напряжение с АКБ к данным пределам. Для этого на выходе АКБ подключаются DC/DC-преобразователь DA2 XL6009, выходное напряжение которого составляет +12 В. Для получения напряжений +5 В и +3,3 В устанавливаются на выходе АКБ стабилизаторы напряжения 78D05L и AMS1117-3.3. Так как для питания операционных усилителей необходимо также напряжение -5В, то для этого подключается DC/DC-преобразователь с отрицательным выходным напряжением LT8330.

Для контроля напряжения на АКБ выходное напряжение с выхода АКБ подключено ко входу АЦП через делитель напряжения R23 и R24. АЦП преобразует напряжение АКБ и выводит информацию о нём на экран.

Для включения дефибриллятора и задания необходимых параметров подключены кнопки SB1–SB5.

Техника безопасности при работе с автоматическим внешним дефибриллятором.

1. В целях обеспечения безопасности и исключения возможности поражения электрическим током обслуживающего персонала запрещается:

- вскрывать аппарат вне специализированных ремонтных предприятий;
- пользоваться аппаратом, имеющим механические повреждения корпуса, электродов, кабелей;
- производить разряд при короткозамкнутых электродах дефибрилляции;
- прикасаться к пациенту в момент дефибрилляции;
- устанавливать и извлекать предохранители при включенном аппарате;
- включать принтер с незаправленной в него бумагой.

2. К работе с аппаратом допускается персонал, изучивший правила по технике безопасности при работе на электроустановках и с электронными медицинскими приборами.

3. Все приборы и оборудование, не имеющие защиты от импульсов дефибрилляции, должны быть отсоединены от пациента.

4. Предохранять от механических повреждений электроды, кабеля и корпус аппарата.

5. При техническом обслуживание запрещается применять различные растворители (ацетон, бензин и т.п.), а также вещества, содержащие щелочи.

6. Не производить чистку при включенном аппарате.

7. Хранение дефибрилляторов должно производиться в сухих отапливаемых помещениях с температурой окружающей среды от плюс 1 до плюс 40°С при относительной влажности не более 80%.

8. При эксплуатации прибора не допускать толчков и ударов.

Перспективы разработки и улучшения автоматических внешних дефибрилляторов. Данная тема всегда будет актуальна, учитывая то, что в 21 веке у большинства населения имеются проблемы с сердцем и сердечно-сосудистой системой в целом. Именно поэтому, автоматические внешние дефибрилляторы в долгосрочной перспективе будут нуждаться в улучшении и проработки, так как актуальность проблемы с сердечно-сосудистой системой у населения с каждым годом лишь усиливается, и в экстренных ситуациях автоматический внешний дефибриллятор является ключевым звеном в спасении жизни человека.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что электрическая дефибрилляция остается наиболее эффективным методом восстановления сердечного ритма при внезапной остановки сердца, а своевременность ее проведения является критическим фактором выживаемости. Широкое внедрение автоматических внешних (наружных) дефибрилляторов в местах массового скопления людей, массовое обучение населения навыкам базовой сердечно-легочной реанимации (СЛР) и развитие сетей экстренного оповещения являются необходимыми мерами для значительного повышения шансов на спасение жизни при внебольничной остановке сердца. Дальнейшее совершенствование методов и аппаратуры для дефибрилляции, наряду с организационными мероприятиями по повышению ее доступности, является перспективным направлением для снижения смертности от внезапной сердечной смерти.

## Библиографический список

1. Бокерия Л.А., Ревишвили А.Ш., Неминущий Н.М. Внезапная сердечная смерть. М.:Гэотар-медиа, 2011. 272 с.

2. Бокерия Л.А., Ревишвили А.Ш., Неминущий Н.М. Имплантируемые кардиовертеры-дефибрилляторы: профилактика внезапной сердечной смерти. *Кардиология.* 2009; 2: 84 – 90.

3. Востриков В.А., Горбунов Б.Б., Гусев А.Н. и др. Динамика изменения сопротивления грудной клетки в процессе воздействия биполярного импульса дефибрилляции Гурвича–Венина. *Медицинская техника.* 2009; 6: 33 – 379.

4. Гаврилова Е.А., Земцовский Э.В. Внезапная сердечная смерть и гипертрофия миокарда у спортсменов. *Вести аритмологии*. 2010; 62: 59 – 62.

5. Дегтярева Е.А, Поляева Б.А. Актуальные проблемы детской спортивной кардиологии. М.: РАСМИРБИ, 2009. 132 с.

6. Кузнецов В.А., Фанаков А.В., Шабалков Э.А. и др. Применение автоматических наружных дефибрилляторов при жизнеугрожающих тахиаритмиях в кардиологическом блоке интенсивной терапии. *Вести аритмологии.* 2009; 55: 10 – 3.

7. Мрочек А.Г., Горбачев В.В. Экстремальная кардиология: профилактика внезапной сердечной смерти: руководство для врачей. М.: Медицинская книга, 2010. 432 с.

8. Меликулов А.Х., Шварц В.А., Сергеев А.В. Сердечная ресинхронизирующая терапия при синдроме Марфана (клинический случай). *Бюл. медиц. Интернет- конференций.* ID: 2013-06-4020-A-2783.

9. Телышев Д.В. Методика определения оптимальных параметров при анализе ритмов сердца в автоматических электрических дефибрилляторах. *Актуальные достижения европейской науки*. 2010. С. 31 – 3.

10. Шляхто Е.В., Арутюнов Г.П., Беленков Ю.Н. Национальные рекомендации по определению риска и профилактики внезапной сердечной смерти. *Архивъ внутренней медицины.* – 2013.

© Аюпов Г.Т., 2026

УДК 616-078.33

А.А. БАБИКОВА
*babikova.anyuta07@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Ю.О. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРОБЛЕМА АНАЛИЗА КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ ПРИ НЕСТАНДАРТНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ЖИЗНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

*Аннотация*. В статье представлена методика количественной оценки уровня здоровья человека, основанная на аналитической обработке основных физиологических биомаркеров 0-типа. Рассматриваются проблемы отсутствия в общей статистике нестандартных случаях самочувствия человека при нормальных показателях биомаркеров. Приводятся возможные решения для расширения допустимых нормальных значений.

*Ключевые слова*: биомаркеры; здоровье; энергетический показатель; заболевание; лечение; индекс здоровья; физиологические параметры.

Существующие биомаркеры здоровья человека являются ключевыми показателями оценки показателей его физического состояния. Поскольку существующие методики анализа как правило основываются на применении физиологических биомаркеров 0-типа рассмотрим качественные характеристики с точки зрения практического применения [1].

На практике выделение определенных показателей для анализа общего физического состояния здоровья человека как правило помогает выявить отклонения от нормальных значений и выявить ряд заболеваний на ранних стадиях, однако данная методика не учитывает особенности организма конкретного человека. К примеру, согласно биомаркерам текущее состояние индивида можно признать нормальным, в то время как его самочувствие может быть удовлетворительным. Хотя данная особенность формально является исключением и обычно не учитывается в статистике, на деле она встречается довольно часто. [2].

Рассмотрим данную особенность в ключе современного здравоохранения. Поскольку в настоящее время оно находится на этапе трансформации от реактивной модели («лечение по факту заболевания») к упредительной и предиктивной медицине данная проблема встречается все реже, так как она основана на применении цифровых двойников. Ключевой особенностью их интеграции можно считать инструменты трансформации, позволяющие в режиме реального времени отслеживать динамику физиологических параметров и прогнозировать риски развития патологий на субклинической стадии, в том числе в случаях, не входящих в диапазон «нормальных» показателей. Это позволяет учитывать допустимые значения, выходящие за рамки общепризнанных по другим показателям на основе анализа идентичных случаев.

В основе данной методики лежит расчёт комплексного показателя уровня (индекса) здоровья (ИЗ) – интегральной количественной характеристики энергетического потенциала психосоматики человека, учитывающей состояние восьми основных функциональных систем организма (периферийная НС, центральная НС, иммунная система, система кровообращения, система кроветворения, система дыхания, костно-мышечная система, эндокринная система), с допущениями, учитывающими другие значения «нормы».

Поскольку биомаркеры «0»-типа определяются как объективные, количественно измеряемые индикаторы нормальных биологических процессов, отражающие равновесие или начальные признаки разбалансировки соматики их отклонение в особенности для редких нормальных показателей физического здоровья, является наиболее острой проблемой, поскольку включение данных показателей в общую выборку может изменить общие стандартизированные значения. Для того, чтобы нормальная выборка достоверно указывала необходимые биомаркеры здоровья человека необходимо сравнить показатели

до включения новых значений в выборку и после, затем произвести расчёты индекса здоровья по 9 ключевым маркерам, которые охватывают весь спектр систем регуляции:

1. Уровень глюкозы в крови (Гл)
2. Частота сердечных сокращений / пульс (ЧСС)
3. Артериальное давление (АД)
4. Температура тела (Т)
5. Максимальное потребление кислорода (МПК)
6. Индекс массы тела (ИМТ)
7. Уровень гемоглобина (Г)
8. Уровень общего холестерина (Х)
9. Кислотно-щелочной баланс крови (pH / Б)

Однако стоит учитывать, что здоровье человека является количественной интегральной характеристикой состояния соматики, включающей антропометрические (рост, вес и др.), физические (частота пульса, артериальное давление и др.) и биологические параметры (состав кишечной флоры, кислотно-щелочной баланс крови, уровень холестерина и др.) и выборка должна быть различной в зависимости от того какой из показателей выбивается из общей нормы. Примером, иллюстрирующим важность разделения выделяющихся показателей одних индивидов от других, можно считать расчет значений биомаркеров для прогнозирования заболеваний по известным биомаркерам. Для того, чтобы прогноз текущего состояния был сделан верно в нормальной выборке значений артериального давления от 120 до 140 необходимо включать значения только по данному показателю, к примеру включив в выборку значения от 140 до 150, если включить в данную выборку другие показатели, например гемоглобина с значениями от 100 до 140 прогноз заболевания будет сделан не верно и отклонение от достоверного значения будет сильно отличаться от нормальных значений из-за чего ранее входившие в выборку допустимые показатели могут из нее выпасть.

Для того, чтобы расчет биомаркеров был выполнен верно недостаточно разделять по направлениям новые биомаркеры, нужно также учитывать привязку референсных значений с учётом гендерных и антропометрических особенностей, что исключит ошибку применения усреднённых «больничных норм» к конкретному индивидууму и позволит решить проблему заболеваний при нестандартных показателях.

Таким образом существующие биомаркеры позволяют определять нормальные показатели здоровья человека, однако они не учитывают физиологические особенности индивидуумов, выходящих за рамки нормы из-за чего ряд заболеваний может выявляться несвоевременно или выявляться ошибочно.

**Библиографический список**

1. Кокорин В. Н. Цифровые двойники биосистемы человека как механизм искусственного интеллекта в здравоохранении / В. Н. Кокорин. – Ульяновск : УлГТУ, 2023. – 91 с.

2. Комарова Ж. Биомаркеры и их ценность / Комарова Ж. . – Минск : Наука и инновации, 2019. 4 – 8 с.

3. Конради А.О. Биомаркеры, их типы и основы применения в персонализированной медицине. Российский журнал персонализированной медицины. 2022;2(3): 6-16.

4. Беневоленский Д.С. Биомаркёры в диагностике неотложных состояний. В кн.: Научно-образовательный форум «Актуальные проблемы современной лабораторной диагностики». Казань; 2011: 18—20.

© Бабикова А.А., 2026

УДК 616-078.33

А.А. БАБИКОВА
*babikova.anyuta07@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Ю.О. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# АЛГОРИТМ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЙ

*Аннотация*. В статье рассматривается методика количественной оценки уровня здоровья человека на основе расчёта комплексного энергетического показателя. Представлен алгоритм классификации пациентов на три клинические группы. Методика базируется на аналитической обработке девяти биомаркеров «0»-типа, их нормализации, взвешивании по значимости в восьми системах регуляции психосоматики и учёте коэффициента системной сбалансированности.

*Ключевые слова*: индекс здоровья, биомаркеры «0»-типа, энергетический потенциал, классификация пациентов.

В монографии [1] предложена методика расчёта комплексного показателя уровня (индекса) здоровья, позволяющая перевести интегральное понятие «здоровье» в управляемую цифровую метрику. Цель настоящей статьи — систематизировать данную методику и представить алгоритм классификации пациентов на три группы: полное здоровье, предболезнь и болезнь.

Предложенный метод представляет собой системный алгоритм перевода физиологических параметров в единую числовую метрику, характеризующую функциональное состояние организма. В основе лежит идея о том, что здоровье можно выразить через энергетический потенциал биосистемы, рассчитываемый на основе девяти ключевых индикаторов здоровья – биомаркеров «0»-типа.

Предлагаемый алгоритм представляет собой математическую модель перевода качественных физиологических состояний организма в

количественную метрику — индекс здоровья (ИЗ). Данный показатель характеризует энергетический потенциал психосоматики человека и позволяет оценить степень сбалансированности функциональных систем организма. Процесс расчёта состоит из последовательных этапов, обеспечивающих точность и индивидуализацию оценки.

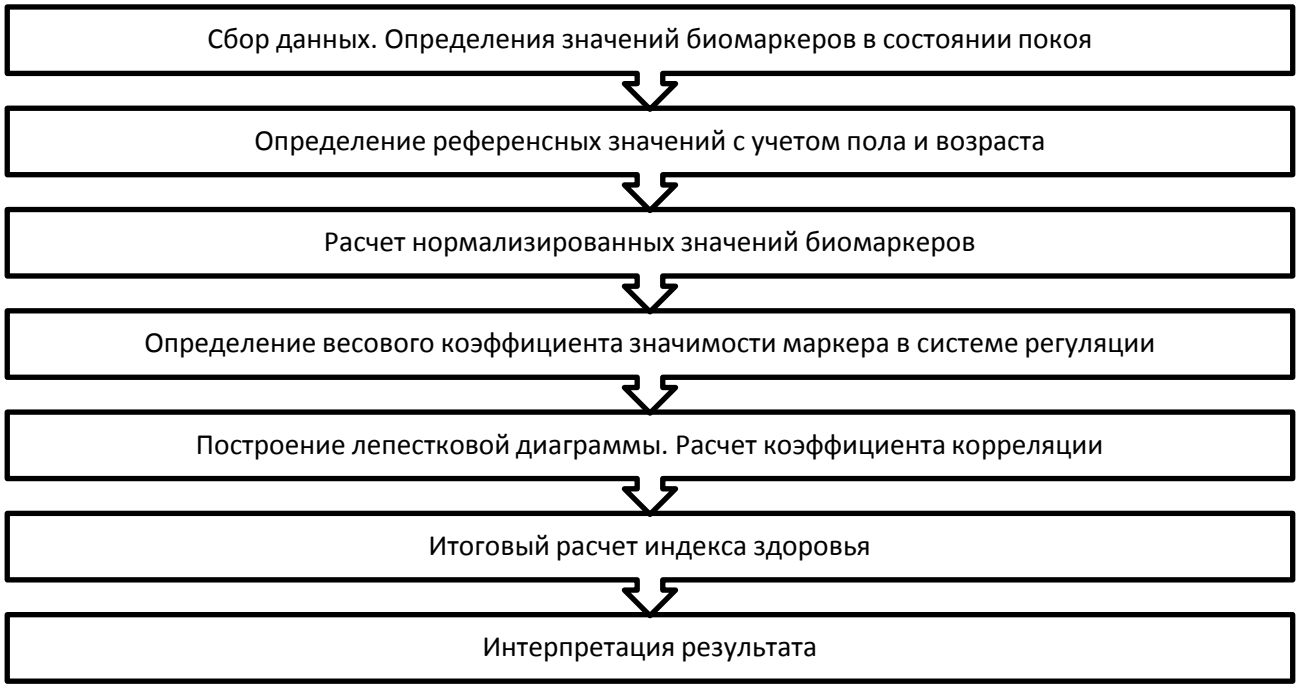



*Рис.1.* Алгоритм вычисления энергетического показателя

Первый этап алгоритма начинается с сбора данных о пациенте. В состоянии относительного физического покоя у пациента фиксируются значения девяти ключевых биомаркеров «0»-типа. К ним относятся: уровень глюкозы, частота сердечных сокращений (пульс), артериальное давление, температура тела, максимальное потребление кислорода (МПК), индекс массы тела (ИМТ), уровень гемоглобина, общий холестерин и кислотно-щелочной баланс (pH) крови. Выбор именно этих параметров обусловлен тем, что они объективно отражают состояние всех основных регуляторных систем организма (нервной, сердечно-сосудистой, иммунной, эндокринной и др.)

Критически важным шагом является определение индивидуальных норм (референсов) для каждого маркера. В отличие от усреднённых клинических норм, данная методика учитывает, что оптимальные показатели меняются в течение жизни. Исходя из пола и возраста из специальных таблиц выбираются эталонные значения. Это обеспечивает корректность сравнения текущего состояния с биологической нормой для конкретного индивидуума.

Поскольку биомаркеры измеряются в разных единицах (мм рт. ст., уд./мин, ммоль/л), их невозможно суммировать напрямую. Для решения этой задачи применяется процедура нормализации. Для каждого маркера вычисляется безразмерный коэффициент, который показывает степень близости текущего показателя к референсному. В результате все параметры

приводятся к единому диапазону от 0 до 1, где значение, близкое к 1, свидетельствует об идеальном соответствии норме, а снижение коэффициента указывает на отклонение.

Следующий этап учитывает физиологическую иерархию организма. Не все биомаркеры вносят одинаковый вклад в работу каждой из восьми функциональных систем. Вводится матрица весовых коэффициентов, определяющая «вес» конкретного маркера для конкретной системы. Например, уровень холестерина имеет высокий весовой коэффициент для периферической нервной системы, но пренебрежимо малый для дыхательной. Произведение нормализованного значения маркера на его весовой коэффициент позволяет оценить вклад каждого показателя в общую картину здоровья конкретной системы.

Для учёта гармоничности работы всех систем вводится коэффициент корреляции $К_{корр}$, рассчитываемый через отношение площадей лепестковых (радарных) диаграмм.

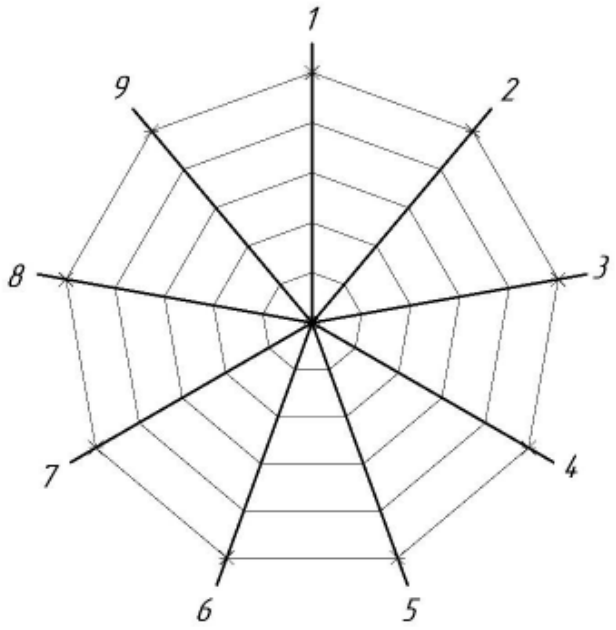



*Рис.2.* Общий вид лепестковой диаграммы
1 – уровень глюкозы; 2 – ЧСС; 3 – артериальное давление; 4 – температура; 5 – МПК; 6 – ИМТ; 7 – уровень гемоглобина; 8 – уровень холестерина; 9 – кислотно-щелочной баланс

Коэффициент отражает, насколько равномерно распределены ресурсы организма. Даже при хороших отдельных показателях сильный перекос в одной из систем снижает $К_{корр}$и, следовательно, итоговый индекс.

Завершающим математическим действием является вычисление комплексного энергетического показателя. Итоговая формула объединяет сумму взвешенных нормализованных значений всех биомаркеров по всем системам регуляции и умножает эту сумму на коэффициент системной

сбалансированности. Полученное число является интегральным индексом здоровья (ИЗ), отражающим текущий энергетический потенциал биосистемы.

Финальный шаг алгоритма — сопоставление полученного значения ИЗ с пороговыми критериями для определения статуса пациента.

Если энергетический показатель входит в диапазон 1,0 0,15, то фиксируется состояние «Полное здоровье», характеризующееся устойчивым гомеостазом и высокими резервами.

Диапазон 0,85 ≤ ИЗ <0,95 соответствует состоянию «Предболезни» (субклиническому дисбалансу), когда функциональные резервы снижены, но органических поражений ещё нет; в этой зоне требуется коррекция образа жизни.

Значение ИЗ <0,85 классифицируется как «Болезнь», указывая на выраженную десинхронизацию систем и необходимость медицинского вмешательства.

Таким образом, алгоритм трансформирует разрозненные медицинские данные в единый управляющий параметр, позволяющий осуществлять предиктивный мониторинг здоровья и создавать цифровые двойники пациента для прогнозирования рисков.

## Библиографический список

1. Кокорин В. Н. Цифровые двойники биосистемы человека как механизм искусственного интеллекта в здравоохранении / В. Н. Кокорин. – Ульяновск : УлГТУ, 2023. – 91 с.

2. Комарова Ж. Биомаркеры и их ценность / Комарова Ж. . – Минск : Наука и инновации, 2019. 4 – 8 с.

3. Гусев А.В., Добринюк С.Л. Искусственный интеллект в медицине и здравоохранении // Информационное общество. – 2017. – №4. – С. 15-21.

4. https://studme.org/123167/menedzhment/lepestkovaya_diagramma «Лепестковая диаграмма», 2022.

© Бабикова А.А., 2026

УДК 615.471

Д.Ш. БАГАУТДИНОВА
*bagautdinova.diana2014@gmail.com*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Ю.О. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ «HEALTH CALCULATOR»

*Аннотация*. Представлена программа «Health Calculator» для расчёта шести показателей физического здоровья по антропометрическим данным (ИМТ, индексы Эрисмана и Кердо, коэффициент выносливости, проба Руфье, ЖЕЛ).

*Ключевые слова*: мониторинг здоровья; антропометрия; программное обеспечение; самодиагностика.

В современном мире наблюдается тенденция к самостоятельному мониторингу физического здоровья. Люди всё чаще используют различные приложения и гаджеты для оценки своего состояния. Однако большинство доступных цифровых решений ориентированы либо на медицинский персонал, либо на пользователей, уже обладающих базовыми знаниями в области физиологии и диагностики. В результате человек без медицинской подготовки оказывается исключён из процесса самостоятельного мониторинга, что снижает эффективность первичной профилактики и контроля состояния здоровья.

Для оценки физического состояния человека используются различные индексы и показатели, такие как индекс массы тела, индекс Эрисмана, индекс Кердо, коэффициент выносливости, проба Руфье и жизненная ёмкость лёгких [1--4]. Эти показатели доступны для расчёта на основе простых антропометрических данных и результатов несложных физиологических измерений. Анализ существующих программных решений [5-7] показал, что их реализация в виде единого интуитивно понятного приложения для массового пользователя отсутствует.

В связи с этим разрабатываемая информационно-измерительная система должна обеспечивать ввод антропометрических и физиологических данных таких как рост, вес, окружность грудной клетки, артериальное давление, частота сердечных сокращений, пульс для пробы Руфье и автоматизированный расчёт необходимых показателей [1-4]. Система обязана интерпретировать результаты путём сравнения с нормами, формировать текстовое заключение, сохранять историю измерений и экспортировать данные в текстовый файл. Среди нефункциональных требований – графический интерфейс с вкладками,

автономность, простота использования, контроль достоверности ввода и локальное хранение данных.

Приложение реализовано на языке Python с использованием библиотеки tkinter для графического интерфейса [8-9]. Выбор обусловлен кроссплатформенностью и наличием встроенных средств для создания оконных приложений без дополнительных зависимостей.

Пользовательский интерфейс, представленный на рисунке 1, организован в виде четырёх вкладок: «Основные параметры», «Сердечно-сосудистая система», «Дыхательная система» и «Проба Руфье». Ниже вкладок расположена область для вывода результатов и кнопки управления.

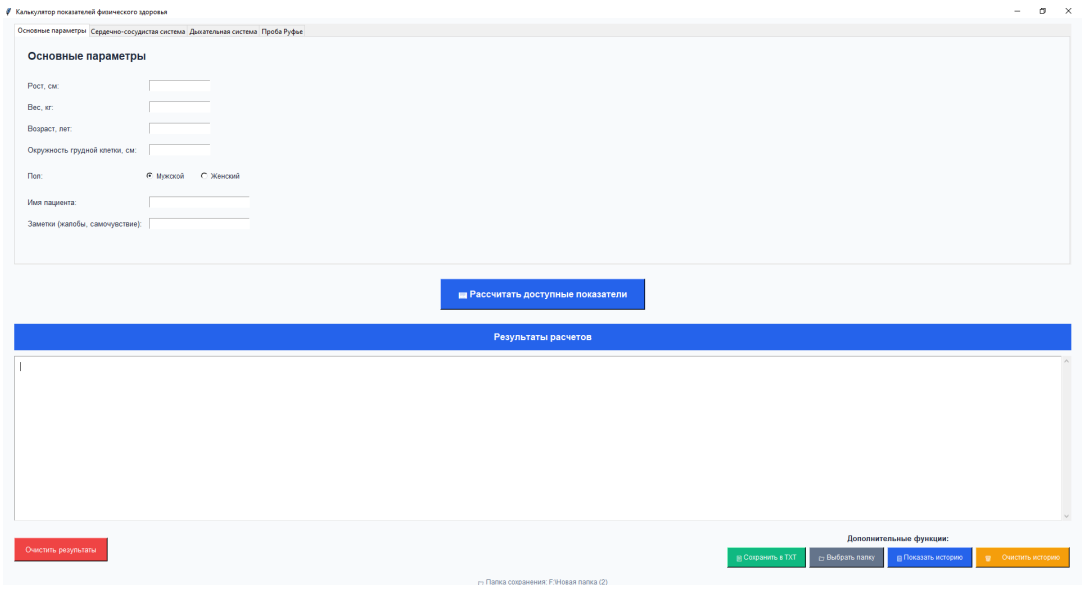



*Рис. 1.* Главное окно приложения

При нажатии кнопки «Рассчитать» программа последовательно проверяет заполненные поля, вычисляет доступные показатели и выводит результат с цветовой индикацией (зелёный – норма, красный – отклонение).

В таблице 1 приведён пример расчёта для тестового профиля (мужчина, 30 лет, рост 180 см, вес 80 кг).

*Таблица 1*

Пример расчета тестового профиля

| Показатель | Значение | Норма | Заключение |
|---|---|---|---|
| Индекс массы тела | 24,7 | 18,5-24,9 | Нормальный вес |
| Индекс Эрисмана | 8 | ≥ 6,0 | Хорошее развитие |
| Индекс Кердо | -14,3 | - | Преобладание парасимпатикуса |
| Коэффициент выносливости | 17,5 | 16 | Недостаточные функциональные возможности |
| Проба Руфье | 87,2 | 4-6 | Хорошая работоспособность |
| ЖЕЛ | 5380 | 3200-5500 | Норма |

Все результаты сохраняются в привязке к имени пациента, представлено на рисунке 2. Предусмотрена возможность добавления текстовых заметок. Просмотр истории реализован в отдельном окне с выбором пациента из выпадающего списка.

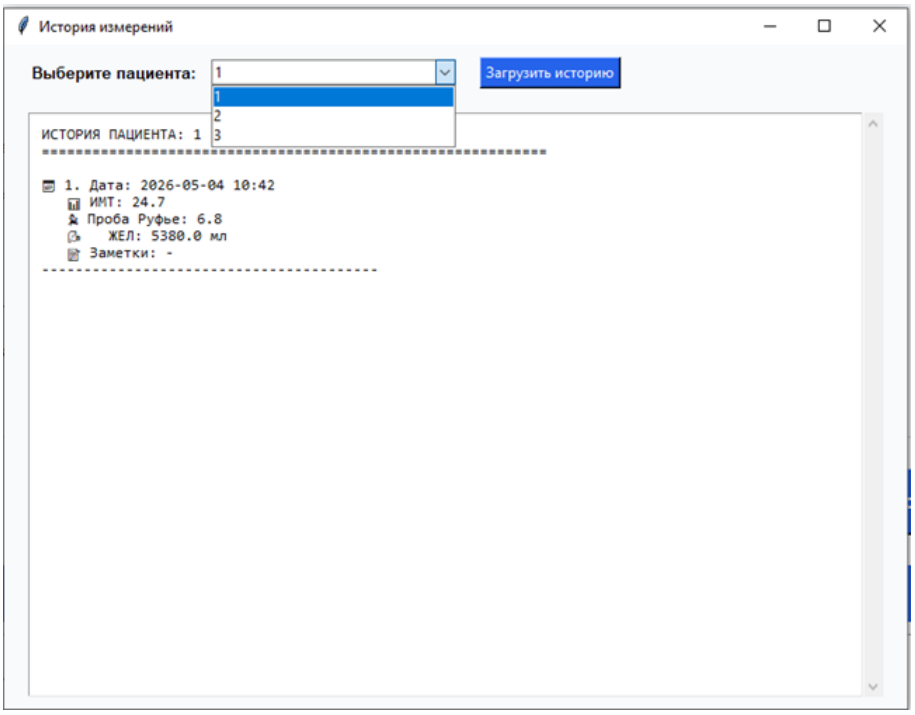



*Рис. 2.* Окно истории измерений для выбранного пациента

Разработанная информационно-измерительная система обеспечивает расчет шести показателей физического здоровья по антропометрическим данным. Система ориентирована на массового пользователя, не требует подключения к интернету, сохраняет историю измерений и предоставляет наглядную интерпретацию результатов. Программа зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ, свидетельство № 2026616862 [10].

## Библиографический список

1. Прояева Л.В. АНТРОПОЛОГИЯ Методические рекомендации проведению практических занятий для студентов, обучающихся по специальности биология.

2. Мониторинг физического развития, физической и функциональной подготовленности учащейся молодежи: учеб. пособие / А. А. Пашин, Н. В. Анисимова, О. Н. Опарина. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. – 142 с.

3. Функциональные пробы в лечебной и массовой физической культуре: учебное пособие / О. М. Буйкова, Г. И. Булнаева ; ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, Курс лечебной физкультуры и спортивной медицины, Кафедра физического воспитания – Иркутск: ИГМУ, 2017. – 24 с.

4. Н А. Скуратова, Л М. Беляева Значение Гарвардского степ-теста в оценке адаптационных возможностей сердечно-сосудистой системы у детей-спортсменов // Проблемы здоровья и экологии. 2011. №1 (27).

5. Петрова Е.Н., Коротков К.Г., Орлов Д.В., Короткова А.К. Принципы построения и структура автоматизированного программно-аппаратного комплекса оценки состояния здоровья // Приборостроение. 2009. №5.

6. Булыга В. В., Шебеко Л. Л. автоматизированная оценка физического состояния и здоровья студенческой молодежи // Вестник Полесского государственного университета. Серия общественных и гуманитарных наук. 2022. №1.

7. Осипенко Евгений Владиславович Использование компьютерной программы «Health correction» в процессе физического воспитания школьников и студентов // Наука-2020. 2016. №5 (11).

8. Букунов, С. В. Разработка приложений с графическим пользовательским интерфейсом на языке Python: учебное пособие для вузов / С. В. Букунов, О. В. Букунова. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 88 с.

9. Титов, А. Н. Введение в Tkinter. Разработка графических интерфейсов в Python: учебно-методическое пособие / А. Н. Титов, Р. Ф. Тазиева. –Казань: КНИТУ, 2023. – 100 с.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616862 Российская Федерация. Программа для расчета и анализа показателей физического здоровья человека «Health Calculator» : заявл. 27.02.2026 : опубл. 12.03.2026 / Д. Ш. Багаутдинова, Ю. О. Уразбахтина ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

© Багаутдинова Д.Ш., 2026

УДК 616–07:612.122.1

Д.О. ВАРАКУТА
*varakuta24@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Е.С. МОРОЗОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ГЛЮКОЗЫ ДЛЯ ПАЦИЕНТОВ С САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ

*Аннотация.* Сахарный диабет - одно из наиболее часто встречающихся заболеваний среди людей. Для поддержания здоровья и сохранения продолжительности жизни люди самостоятельно регулируют уровень сахара в крови. Существует несколько вариантов измерения уровня глюкозы. Долгое

время стандартные глюкометры являлись главным методом измерения, но с развитием технологий появились также непрерывные системы мониторинга.

*Ключевые слова:* Глюкометр, НМГ (непрерывный мониторинг), сахарный диабет, глюкоза, гликемия.

Сахарный диабет – хроническое заболевание, требующее постоянного контроля гликемии. От которого напрямую зависит состояние здоровья и качество жизни пациента [1]. Глюкометр - является самым известным методом контроля глюкозы в крови, но технологическая эволюция внесла свои коррективы и ввела в использование системы непрерывного мониторинга, которые изменили и упростили подход к управлению диабетом, на рисунке 1 представлены виды современных глюкометров [2].




Рис.1. Виды глюкометров

Принцип работы: Система НМГ состоит из 3 компонентов:

1. Сенсор. Гибкий электрод, который вводится в межклеточную жидкость подкожно - жировой ткани и измеряет уровень глюкозы в тканевой жидкости. Сенсор измеряет глюкозу каждые 1 - 5 минут
2. Передатчик. Подключается к сенсору и предает данные на приемник.
3. Приемник или приложение. Специальное устройство или смартфон, которое отображает данные.

Плюсы систем НМГ:

1. Динамика. НМГ показывает график изменения уровня глюкозы со стрелками, указывающими на дальнейшее изменение значения, что позволяет заранее отреагировать [2]. Технология построения амбулаторного профиля глюкозы (АПГ) — одно из наиболее ценных преимуществ НМГ. После 14 дней ношения сенсора система генерирует наглядный отчет, содержащий:

· средний уровень глюкозы;

· время в целевом диапазоне (TIR);

· время выше и ниже целевого диапазона;

· коэффициент вариации (CV);

· прогноз риска гипогликемии.

2. Сигнализация. На приемник или в приложение приходит оповещение о высоких и низких значениях измерения.

Тяжелые гипогликемии — одна из главных причин обращения в стационар у пациентов с диабетом 1 типа. Системы НМГ с функцией оповещения (тревоги при снижении глюкозы до 3,9 ммоль/л и ниже) позволяют предотвратить наступление гипогликемии и ее последствий.

3. Снижение болезненности. Датчик устанавливается 1 раз в 14 дней, что избавляет от ежедневного прокола пальца.

Минусы систем НМГ:

1. Запаздывание показаний. Глюкоза в межклеточной жидкости изменяется на 5-10 минут позже, чем в крови [3].

2. Цена. НМГ значительно дороже, чем глюкометры.

3. Высокая погрешность. На показания могут влиять несколько причин, такие как неправильная установка датчика, неправильная эксплуатация (сильное механическое давление, превышение допустимой температуры использования), а также прием некоторых лекарственных средств [3].

4. Временные неудобства. Датчик может мешать на руке, в особенности детям, а также может вызывать психологические неудобства.

Появление систем НМГ стало большим шагом в развитии диабетологии и внесло новые возможности для контроля уровня гликемии.

НМГ решает три ключевые задачи:

1. Диагностическую — выявляет скрытые нарушения, невидимые при традиционном самоконтроле.

2. Прогностическую — позволяет предотвратить гипогликемию и кетоацидоз благодаря системам оповещения.

3. Организационную — упрощает удаленный мониторинг, повышает приверженность лечению, снижает нагрузку на скорую помощь и стационары.

## Библиографический список

1. Эндокринология: национальное руководство. / Под ред. И.И. Дедова, Г.А. Мельниченко. – 2-е изд. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2023. – 1120 с.

2. Древаль А.В., Болотская Л.Л. Непрерывный мониторинг глюкозы: новые возможности в управлении сахарным диабетом. // Терапевтический архив. – 2020. – Т. 92, №10. – С. 124-130.

3. Суркова Е.В., Майоров А.Ю., Токмакова А.В. Самоконтроль гликемии при сахарном диабете: от глюкометра к системам непрерывного мониторинга. // Сахарный диабет. – 2021. – №24(1). – С. 78-85.

© Варакута Д.О., 2026

УДК 57.088.7.

Р.И. ВИЛЬДАНОВ
*radmir.vildanov.04@mail.ru*
Науч. руководов. – кандидат технических наук, доцент. Е.С. МОРОЗОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИНФУЗИОННЫЙ НАСОС С МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ КОНТРОЛЕМ СКОРОСТИ ВЛИВАНИЯ

*Аннотация.* В статье рассматривается разработка инфузионного насоса с микроконтроллерным управлением, обеспечивающего точное дозирование лекарственных растворов. Описаны структурная и принципиальная схемы устройства, алгоритм работы системы контроля частоты капель, а также результаты моделирования в среде SimInTech.

*Ключевые слова:* инфузионный насос; микроконтроллер; автоматизация; датчик капель; метрология; медицинская аппаратура; микроэлектроника; телемедицина.

## Введение

Инфузионная терапия является одним из наиболее распространённых методов лечения в стационарной и амбулаторной практике, обеспечивая контролируемое введение лекарственных препаратов, электролитных растворов и компонентов крови [1]. Точность дозирования и надёжность контроля скорости вливания напрямую влияют на эффективность лечения и безопасность пациента.

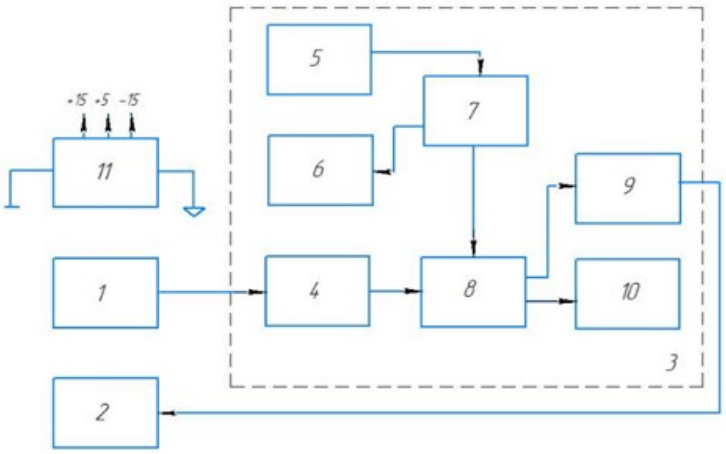
Традиционные гравитационные системы инфузии требуют постоянного визуального контроля со стороны медицинского персонала и подвержены влиянию внешних факторов: изменения положения капельницы, колебаний артериального давления пациента, механических воздействий [2]. Автоматизированные инфузионные насосы позволяют устранить эти недостатки, обеспечивая стабильную скорость введения независимо от внешних условий.

Целью данной работы является разработка инфузионного насоса с микроконтроллерным управлением, способного автоматически контролировать частоту капель, отображать параметры инфузии и сигнализировать о нештатных ситуациях.

## Разработка устройства

Разработанное устройство построено по модульному принципу и включает следующие функциональные блоки: датчик пролёта капли, формирователь импульсов, анализатор соответствия заданной и реальной

частоты, микроконтроллерный узел, система индикации, матричная клавиатура, токовый ключ с исполнительным механизмом и источник питания (рис. 1).




| Номер | Наименование |
|---|---|
| 1 | Датчик капель |
| 2 | Зажимное устройство |
| 3 | Блок управления |
| 4 | Формирователь сигнала пролета капли |
| 5 | Блок клавиатуры |
| 6 | Блок индикации |
| 7 | Микроконтроллер |
| 8 | Анализатор частоты пролета капель |
| 9 | Токовый ключ |
| 10 | Блок звуковой сигнализации |
| 11 | Блок питания |

*Рис. 5.* Структурная схема устройства

Принцип работы устройства начинается с установки полимерной трубки в зажимное устройство и фиксации контейнера с раствором. После задания целевой скорости вливания с помощью клавиатуры и нажатия кнопки «Старт» микроконтроллер разблокирует прижимной механизм, инициируя падение капель. При прохождении капли через оптический зазор датчика формируется электрический импульс, который поступает на формирователь и далее на анализатор частоты. Микроконтроллер сравнивает реальную частоту с заданной, и при расхождении более ±5% корректирует положение соленоидного клапана через токовый ключ. Текущие параметры выводятся на четырёхразрядный семисегментный индикатор. При обнаружении засора, окончания раствора или критического отклонения активируется звуковая и световая сигнализация.

**Проектирование принципиальной электрической схемы**

Принципиальная электрическая схема блока управления и индикации (рис. 2) разработана с учётом требований электробезопасности медицинской аппаратуры и обеспечивает гальваническую развязку аналоговой и цифровой частей. Питание цифровой логики и микроконтроллера осуществляется стабилизированным напряжением +5 В, аналоговые узлы (операционный усилитель, датчик) питаются от ±15 В. Преобразование напряжений выполнено с использованием DC-DC преобразователя SIM2-0915D-SIL7 и линейного стабилизатора К142ЕН5. Сигналы управления

исполнительными цепями формируются через опторазвязку и цифровой транзистор, что исключает влияние помех от соленоида на микроконтроллер.

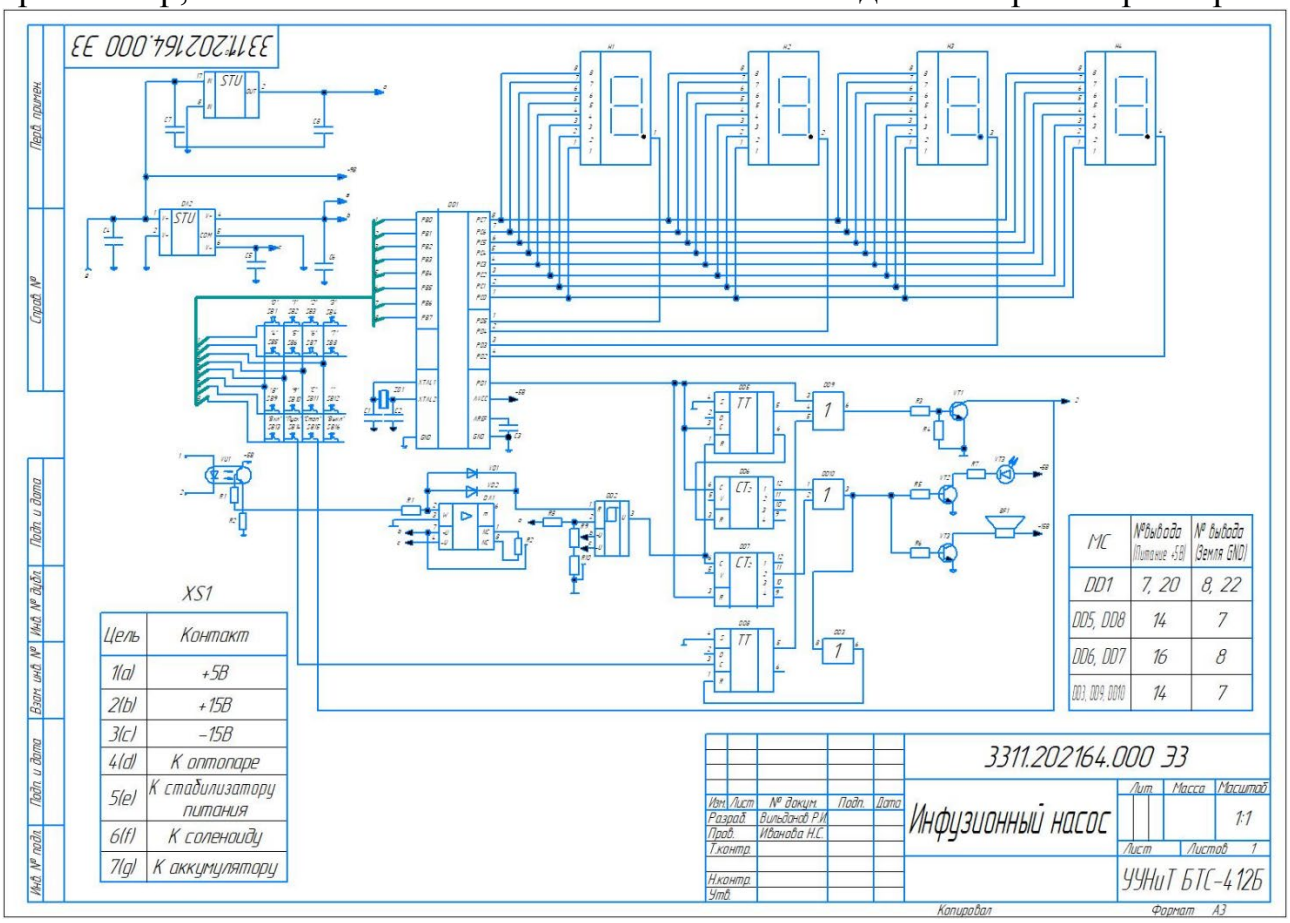



*Рис. 2.* Принципиальная схема устройства

**Обоснование выбора элементной базы**

Датчик пролёта капли. В качестве чувствительного элемента выбран транзисторный оптрон АОТ123А. Устройство обеспечивает гальваническую развязку до 100 В, коэффициент передачи тока позволяет формировать сигнал без дополнительных усилителей. Резистор R1=100 кОм между базой и эмиттером фототранзистора задаёт рабочую точку и снижает влияние внешних засветок.

Формирователь импульсов. Для преобразования аналогового сигнала оптрона в прямоугольные импульсы постоянной амплитуды применён операционный усилитель К140УД26, отличающийся сверхнизким уровнем шума и входным током смещения 35 нА. Стабилизация амплитуды и ограничение выбросов реализованы с помощью стабилитрона Д808 и диода КВ522А. Триггер Шмитта К561ТЛ1 обеспечивает чёткие фронты импульсов и подавление дребезга при медленном изменении входного сигнала.

Анализатор частоты. Сравнение заданной и реальной частоты пролёта капель выполнено на базе логических элементов К176ЛЕ5, счётчика КМ155ИЕ5 и D-триггеров К155ТМ2. Схема формирует управляющий сигнал при отклонении частоты от заданной более чем на ±5%, который передаётся на микроконтроллер.

Микроконтроллерный узел. Центральным управляющим элементом выбран ATmega8L. Устройство обладает 8 КБ флэш-памяти, 1 КБ SRAM, 10-разрядным АЦП и широким набором периферийных интерфейсов. Низкое энергопотребление и работа в диапазоне напряжений 2,7–5,5 В делают его оптимальным для портативной медицинской аппаратуры.

Система индикации и клавиатура. Отображение параметров реализовано на четырёх семисегментных индикаторах BS-AD16RD с динамической индикацией. Управление осуществляется через матричную клавиатуру 4×4 (16 кнопок), подключаемую к портам микроконтроллера с программным подавлением дребезга.

Исполнительный механизм. Регулировка потока жидкости выполняется цифровым транзистором PDTC144EE со встроенными резисторами базы, что упрощает схему согласования с логическими уровнями микроконтроллера. Транзистор управляет соленоидным клапаном и зажимным устройством, обеспечивая точное дозирование.

Источник питания. Устройство питается от аккумуляторной батареи типа «Крона» (9 В, 500 мАч). Преобразователь SIM2-0915D-SIL7 формирует ±15 В для аналоговой части, а К142ЕН5 обеспечивает стабилизированные +5 В для цифровой логики. Фильтрация помех выполнена с помощью конденсаторов и дросселей на входах питания.

**Метрологический анализ устройства**

Точность устройства оценивается по суммарной погрешности функциональных узлов. Погрешность датчика на базе оптрона AOT123A составляет $\delta_1$ = 0,30%. Погрешность аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера (разрядность 10 бит, опорное напряжение 5 В) оценивается как $\delta_2$ = 0,25%. Вклад резистивных элементов с допуском ±1% и температурной нестабильностью составляет $\delta_3$ = 0,15%.

Суммарная погрешность рассчитана по методу сложения независимых погрешностей:

$$\delta_\Sigma = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = \sqrt{0,30^2 + 0,25^2 + 0,15^2} \approx 0,43\% \qquad [1]$$

Полученное значение удовлетворяет требованию технического задания ($\delta \leq 1\%$), что подтверждает метрологическую пригодность разработанного устройства для клинического применения.

Расчёт потребляемой мощности показал, что суммарное энергопотребление в рабочем режиме не превышает 1,2 Вт. Основные потребители: микроконтроллер (125 мВт), индикаторы (600 мВт), триггеры и логические элементы (250–290 мВт), операционный усилитель (75 мВт). При питании от батареи ёмкостью 500 мАч обеспечивается время автономной работы до 400 часов.

**Технологические особенности изготовления печатной платы**

Изготовление печатной платы выполнено комбинированным (аддитивно-субтрактивным) методом на основе фольгированного стеклотекстолита FR-4 толщиной 1,5 мм. Данный способ обеспечивает высокую механическую прочность токопроводящих дорожек, надёжность металлизированных отверстий и точность формирования проводников, необходимых для корректной работы цифровых и аналоговых узлов.

Технологический процесс включает раскрой заготовок, сверление монтажных и переходных отверстий, химическую металлизацию, нанесение фоторезиста, экспонирование и проявление защитного рисунка, гальваническое наращивание меди толщиной 25–35 мкм, травление незащищённых участков, нанесение паяльной маски и маркировки. Минимальная ширина проводников и зазоров между ними составляет 0,25 мм. Все отверстия выполнены металлизированными. Паяльная маска защищает медные участки от окисления и предотвращает образование перемычек при монтаже. Компоненты устанавливаются комбинированным способом с последующим контролем качества паяных соединений и электрической проверкой цепей на соответствие проектным параметрам.

**Моделирование и верификация в среде SimInTech**

Для верификации алгоритма управления до аппаратной реализации разработана имитационная модель в среде SimInTech. Модель построена по модульному принципу и включает блок ввода сигналов (датчик капель, кнопки управления), вычислительное ядро (микроконтроллер) и блок вывода (токовый ключ, зажимное устройство, звуковая сигнализация, семисегментные индикаторы).

Внутри блока «Язык программирования» реализован алгоритм контроля частоты капель, обработки команд клавиатуры, формирования ШИМ-сигнала для соленоида и динамической индикации. Кодогенератор SimInTech автоматически преобразует модель в исходный код на языке C, совместимый с Arduino IDE. Процесс кодогенерации включает указание имени алгоритма, выбор шаблона кода, настройку директории сохранения и сборку модулей. В результате формируются файлы прошивки infuzomat.ino и конфигурационные заголовочные файлы, которые компилируются и загружаются в микроконтроллер ATmega8L. Моделирование подтвердило корректность логики управления, отсутствие конфликтов сигналов и устойчивость алгоритма к внешним возмущениям.

**Заключение**

В результате выполненной работы разработана конструкция инфузионного насоса с микроконтроллерным управлением, обеспечивающего автоматический контроль частоты капель с погрешностью не более 0,43%, визуальное отображение параметров инфузии и сигнализацию при отклонении от заданного режима. Устройство может быть использовано как в условиях

стационара, так и в системах домашней медицинской помощи. Перспективным направлением развития является интеграция модуля беспроводной передачи данных для удалённого мониторинга в рамках телемедицинских платформ.

**Библиографический список**


1. Козинец Г.И., Макаров В.А. Исследование системы крови в клинической практике. — М.: Триада-Х, 1997. — 480 с.
2. Щедрина Е.А. Особенности инфузионной терапии: дис. ... канд. биол. наук. — М., 2000. — URL: https://antiage-expert.com/ru/blog/osobennosti-infuzionnoy-terapii/ (дата обращения: 01.05.2026).
3. Инфузионная терапия: учебно-методическое пособие / СПбГМУ им. И.П. Павлова. — URL: https://studfile.net/preview/1823459/ (дата обращения: 01.05.2026).
4. Патент № RU2579620C2. Инфузионные насосы / Р.Э. Смит [и др.]; заявл. 23.09.2011; опубл. 27.10.2014.
5. Патент № SU1346163A1. Инфузионный насос / Н.А. Льянов; заявл. 30.12.1985; опубл. 23.10.1987.
6. Патент № A61M5/142. Инфузионное устройство для введения жидкостей в широком диапазоне прозрачности; заявл. 20.10.2002; опубл. 27.12.2003.
7. ATmega8L Datasheet. — Microchip Technology, 2023. — URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega8A-8L-16-16L-32-32L-DS40002069A.pdf (дата обращения: 01.05.2026).
8. SimInTech: Руководство пользователя. Версия 4.2. — ООО «ИНТЕЛЛЕКТ», 2024.
9. ГОСТ Р 50267.0-92. Изделия медицинские электрические. Часть 1. Общие требования безопасности. — М.: Стандартинформ, 2020.


© Вильданов Р.И., 2026

УДК 004.891.3

К.И. ГИЗЗАТУЛЛИНА
*kamila03082@gmail.com*
Науч. руковод. – к.т.н., доцент кафедры БМИ З.И. ХАРИСОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД

*Аннотация.* В статье рассматриваются возможности использования технологий искусственного интеллекта для автоматизации интерпретации результатов медицинских анализов (на примере анализов мочи). Показано, что внедрение нейросетевых алгоритмов в лабораторную диагностику позволяет

повысить точность и скорость исследований, снизить влияние человеческого фактора.

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, анализ мочи, лабораторная диагностика, инновации в медицине, медицинское образование, нейронные сети.

Общий анализ мочи является одним из наиболее распространенных и информативных методов лабораторной диагностики. Он позволяет оценить работу почек, выявить воспалительные процессы, нарушения обмена веществ и многие другие патологические состояния организма. Ежедневно в лабораториях по всему миру выполняются миллионы таких исследований. Но традиционный метод микроскопии осадка мочи имеет существенные недостатки:

– зависимость результатов от квалификации и опыта лаборанта;
– субъективность оценки;
– высокая трудоемкость и утомляемость персонала;
– сложность унификации и стандартизации результатов.

В настоящее время наблюдается активная интеграция искусственного интеллекта в автоматизированное решение многих прикладных задач в медицине за счет высокой точности работы интеллектуальных систем, возможности их модификации, способности к обработке больших массивов данных в короткие временные интервалы [1]. Цель данной статьи – рассмотреть возможности применения искусственного интеллекта (далее – ИИ) в интерпретации анализов мочи как междисциплинарную инновацию, объединяющую медицинскую практику и систему профессионального образования.

Автоматизация анализа осадка базируется на технологиях компьютерного зрения, использующих сверточные нейронные сети. Цифровое изображение проходит сегментацию, классификацию, количественный анализ. Нейросети обучаются на тысячах размеченных слайдов: больше данных, разнообразнее выборка – выше точность распознавания.

Искусственный интеллект значительно повышает скорость и точность анализа данных, что позволяет медицинским специалистам точнее диагностировать заболевания и выбирать наилучшие методы лечения. Это приводит к повышению качества медицинских услуг, одновременно снижая нагрузку на медицинский персонал благодаря автоматизации рутинных задач. Кроме того, ИИ обеспечивает возможность бесшовной интеграции с существующими медицинскими системами, что упрощает его внедрение в медицинскую практику [2].

Помимо базового подсчета форменных элементов, современные ИИ-системы способны решать более сложные диагностические задачи. Например, они могут не просто обнаружить эритроциты, но и определить их морфологию, что имеет важное значение для дифференциальной диагностики гематурии. Также алгоритмы способны классифицировать типы кристаллов, что помогает в

диагностике мочекаменной болезни и нарушений обмена веществ. Однако важно понимать, что искусственный интеллект не заменяет врача полностью. Оптимальной является модель «врач плюс ИИ», где алгоритм выполняет рутинную работу, а специалист контролирует и при необходимости корректирует его.

ИИ рассматривается не только как инструмент оптимизации клинических и административных процессов, но и как технологическая основа для новой парадигмы здравоохранения, в которой акцент смещается с лечения на профилактику и раннее выявление заболеваний [3]. Автоматизация рутинного труда позволяет оптимизировать штатное расписание и перераспределить нагрузку персонала. Сокращение времени анализа ускоряет оборот коечного фонда в стационарах и повышает удовлетворенность пациентов. Цифровые архивы изображений позволяют проводить ретроспективный анализ сложных случаев и использовать накопленные данные для научных исследований [4].

Внедрение ИИ в лабораторную диагностику требует пересмотра подходов к подготовке медицинских специалистов. Медицинский персонал должен обладать навыками работы с цифровыми технологиями и пониманием принципов работы медицинских информационных систем [5]. Для эффективной работы с ИИ-системами специалисту необходимо базовое понимание принципов работы искусственного интеллекта, навыки критической оценки результатов, умение распознавать ситуации, когда алгоритм может ошибаться. Важно сохранять навыки классической микроскопии для проверки сомнительных результатов, а также понимать границы применимости технологии.

Междисциплинарная подготовка медицинских кадров невозможна без интеграции в учебные планы элементов цифровой медицины. Студентам требуется глубокое погружение в принципы работы диагностического оборудования с ИИ, практика на симуляторах, отработка алгоритмов анализа образцов. Продвижение ИИ в лабораторной диагностике стимулирует создание совместных исследовательских проектов с участием студентов и молодых ученых [6]. Такие задачи развивают не только научную мыслительную культуру, но и формируют у будущих специалистов навыки взаимодействия в междисциплинарной среде [7].

Системы на базе ИИ эффективны не только в диагностике – их активно используют для обучения. Студенты сравнивают свои выводы при микроскопии с результатами ИИ, анализируют расхождения. Цифровые архивы изображений создают обучающие коллекции для отработки навыков. Рассмотрим гипотетический пример внедрения ИИ-системы в работу лаборатории многопрофильного стационара. После приобретения автоматического анализатора осадка мочи с ИИ-распознаванием время анализа сократилось в пять раз, освободилось время лаборантов для сложных случаев, стандартизация результатов повысила доверие клиницистов, и был создан цифровой архив всех анализов.

Дальнейшее развитие технологий ИИ в лабораторной диагностике связано с интеграцией в лабораторные информационные системы для автоматического формирования заключений, с развитием предиктивной аналитики для прогнозирования рисков заболеваний, с использованием облачных технологий для удаленных консультаций. Таким образом, очевидные преимущества использования интеллектуальных систем: повышение точности за счет высокоскоростного анализа данных; снижение времени анализа; улучшение прогноза развития патологических процессов [8]. В образовательной сфере перспективным является создание открытых баз данных размеченных медицинских изображений для обучения студентов и тренировки алгоритмов.

В заключение необходимо отметить, что ИИ трансформирует процесс анализа мочи, объединяя медицинские практики, информационные технологии и образовательные подходы в единый процесс. Он ускоряет выдачу результатов, обеспечивает стабильность данных и снижает нагрузку на лаборантов. Появляются цифровые хранилища, используемые для отслеживания динамики состояния пациентов. Специалистам приходится переучиваться: нужно понимать принципы работы алгоритмов, работать с интерфейсами, а студенты учатся на симуляциях. Таким образом, технология не заменяет врача – она лишь берет на себя рутину, позволяя сосредоточиться на сути диагноза.

## Библиографический список

1. Пранович А.А., Исмаилов А.К., Карельская Н.А., Костин А.А., Кармазановский Г.Г., Грицкевич А.А. Искусственный интеллект в диагностике и лечении мочекаменной болезни // Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения. 2022. № 2. С. 15-22.

2. Купатенко Я.Г., Мирук А.К., Ломоносова А.В., Козлова А.А. Искусственный интеллект в медицине: обзор текущей ситуации и тенденции // Cifra. Медико-биологические науки. 2024. № 2 (2). URL: https://medbio.cifra.science/media/articles/14419.pdf (дата обращения: 18.04.2026).

3. Вошев Д.В., Шепель Р.Н., Вошева Н.А., Драпкина О.М. Искусственный интеллект в здравоохранении: исторический путь, вызовы и перспективы (1960-2025 гг.) // Первичная медико-санитарная помощь. 2025. Т. 2, № 3. С. 45-52.

4. Обеспечение достоверности и информационной безопасности проведения психофизиологических исследований в рамках уголовного судопроизводства в Российской Федерации и за рубежом / Лонщакова А.Р., Харисова З.И., Антонов В.В. // Евразийский юридический журнал. 2019. № 9(136). С. 240-242.

5. Галстян А.Г., Мартиросян В.А. Цифровая трансформация в здравоохранении // Электронный научный журнал «Век качества». 2024. № 1. С. 88-104. URL: http://www.agequal.ru/pdf/2024/124006.pdf (дата обращения: 20.04.2026).

6. Системная модель интеллектуальной предметно-ориентированной профайлинг-системы / Антонов В.В., Харисова З.И., Мансурова З.Р. [и др.] // Онтология проектирования. 2020. –. 10, № 3(37). С. 338-350.

7. Концепция программно-аналитического комплекса образовательного процесса на основе онтологии и искусственных нейронных сетей / Антонов В.В., Куликов Г.Г., Кромина Л.А. [и др.] // Онтология проектирования. – 2021. – Т. 11, № 3(41). – С. 339-350. – DOI 10.18287/2223-9537-2021-11-3-339-350. – EDN YSKAGX.

8. Трегуб П.П., Жемчугин Д.Е., Зубанов П.С. и др. Перспективы внедрения технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения в лабораторной медицине (обзор литературы) // Здравоохранение Российской Федерации. 2025. Т. 69, № 2. С. 112-119.

© Гиззатуллина К.И., 2026

УДК 004.896

К.И. ГИЗЗАТУЛЛИНА
*kamila03082@gmail.com*
Науч. руководитель – к.т.н., доцент кафедры БМИ З.И. ХАРИСОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СОВРЕМЕННОЙ ДИАГНОСТИКЕ: АЛГОРИТМЫ, МЕХАНИЗМЫ И ТРАНСФОРМАЦИЯ РОЛИ ВРАЧА

*Аннотация*. В статье рассмотрено применение искусственного интеллекта в лучевой и лабораторной диагностике: свёрточные нейросети для анализа МРТ и КТ, большие языковые модели для генерации заключений, алгоритмы классификации клеток крови и биохимических трендов. Проанализированы риски внедрения ИИ (предвзятость данных, гипердиагностика, галлюцинации моделей, деактивация клинического мышления) и трансформация роли врача в условиях цифровизации.

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, лучевая диагностика, лабораторная диагностика, свёрточные нейронные сети, большие языковые модели, клиническое мышление.

Современная клиническая диагностика сталкивается с невероятно быстрым ростом объёма данных: от воксельных массивов магнитно-резонансной томографии (далее – МРТ) до многопараметрических лабораторных профилей. Человеческий мозг, хотя и обладает высокой способностью к адаптации, не может одновременно обрабатывать и анализировать тысячи диагностических признаков. Искусственный интеллект (ИИ) выступает не как замена врачу, а как вспомогательный инструмент,

который автоматизирует и ускоряет рутинные задачи, а также находит скрытые закономерности. Применение подобных технологий открывает перед медициной как перспективы, так и трудности, связанные с обучением специалистов и соблюдением этических стандартов [4].

1. Алгоритмы ИИ в лучевой диагностике

ИИ значительно меняет лучевую диагностику. Свёрточные нейронные сети (CNN) автоматически анализируют компьютерные томограммы грудной клетки, состоящие из 200–500 срезов. Они обнаруживают мельчайшие лёгочные узелки размером до 0,1 мм, определяют их плотность и сравнивают с предыдущими данными пациента. Например, CNN с точностью 92,3% различают различные образования (такие как аденокарцинома, туберкулёзная гранулема или гамартохондрома) по их текстуре и контурам. Это возможно даже для крошечных узелков размером 2 мм, которые могут быть скрыты за тенью ребра.

В магнитно-резонансной томографии (МРТ) ИИ помогает точно сегментировать гиппокампы при диагностике болезни Альцгеймера. Алгоритмы выделяют структуры с точностью до 0,5 мм³, создают трёхмерные модели коры мозга и сравнивают их с нормальными показателями человека для его возрастной группы. Это позволяет выявить нейродегенеративные изменения за 5–7 лет до появления первых симптомов болезни.

Кроме CNN, в лучевой диагностике всё шире применяются большие языковые модели (БЯМ): они генерируют предварительные заключения, выделяют ключевые находки и составляют дифференциальные диагнозы на основе протоколов МРТ и компьютерной томографии (КТ) [1]. Перспективным направлением развития лучевой диагностики является разработка гибридных систем, сочетающих возможности свёрточных нейронных сетей и больших языковых моделей. В рамках такой архитектуры CNN выполняют первичную обработку изображений – сегментацию областей интереса и детекцию аномалий, а языковые модели преобразуют полученные количественные параметры в структурированное клиническое заключение, адаптированное для восприятия врачом‑рентгенологом. Это позволяет сократить время составления протокола и минимизировать риск пропуска малозаметных патологических изменений [1].

В ангиографии применение нейросетевых алгоритмов даёт возможность виртуально исключать костные структуры из визуализации, выделяя исключительно сосудистый рисунок, а также автоматически оценивать степень стеноза сонной артерии с погрешностью не более 2% относительно результатов ручного измерения.

В условиях экстренной диагностики острого ишемического инсульта специализированные алгоритмы за 40 секунд анализируют данные перфузионной компьютерной томографии, определяют объём ядра инфаркта и зону пенумбры, формируя цветную карту клинических рекомендаций. Такая карта может содержать указания о целесообразности проведения тромболизиса или оценке риска геморрагической трансформации. Внедрение подобных

решений позволяет сэкономить до 20 минут, ранее затрачиваемых врачом на ручную постобработку данных.

2. ИИ в лабораторной диагностике

В лабораторной диагностике ИИ также демонстрирует высокую эффективность, особенно в сочетании с цифровой микроскопией. Алгоритмы машинного обучения всё активнее проникают в лабораторную службу, где они берут на себя задачи морфологической идентификации клеток и выявления сложных биохимических паттернов [5]. Искусственный интеллект активно внедряется в гематологию и лабораторную диагностику. Так, нейросети с точностью 98% классифицируют клетки крови (нейтрофилы, лимфоциты, бласты) и выявляют аномалии – это ускоряет подготовку к биопсии костного мозга и повышает точность диагностики. Современные алгоритмы машинного обучения, такие как градиентный бустинг, способны выявлять скрытые закономерности в биохимических анализах. Например, постепенное уменьшение скорости клубочковой фильтрации при неизменном уровне креатинина может указывать на развитие хронической болезни почек за год до того, как показатели выйдут за пределы нормы. Аналогично, повышение уровня щелочной фосфатазы при нормальных значениях печёночных трансаминаз может свидетельствовать о наличии метастазов в костях или холестазе.

В анализе мочи ИИ тоже меняет подход к диагностике: автоматические анализаторы с нейросетями с точностью 99% различают эритроциты и дрожжевые клетки, прогнозируют риск прогрессирования хронической болезни почек, а также помогают скринировать рак мочевого пузыря – они идентифицируют атипичные переходные клетки, которые под микроскопом сложно отличить от реактивных изменений при цистите.

3. Ограничения и риски внедрения ИИ

Однако применение искусственного интеллекта в диагностике сопряжено с рядом трудностей и опасностей. Одним из основных препятствий является проблема предвзятости данных (data bias): если модель обучалась в основном на информации о пациентах определённой этнической принадлежности, её эффективность снижается при работе с другими группами. Например, были зафиксированы случаи ложноположительных диагнозов пневмонии у чернокожих пациентов из-за различий в плотности мягких тканей. Также алгоритмы, обученные на немецких данных, могут ошибочно идентифицировать ураты, распространённые в индийской кухне, как патологические кристаллы [2].

Ещё один риск – гипердиагностика: ИИ способен выявлять мельчайшие изменения, которые в подавляющем большинстве случаев оказываются доброкачественными. Это провоцирует дополнительные обследования и ненужное облучение пациентов. Особую озабоченность вызывают этические проблемы, связанные с большими языковыми моделями. Такие модели могут воспроизводить заблуждения без доказательной базы, предлагать решения, противоречащие актуальным клиническим рекомендациям, или генерировать

правдоподобные, но неверные утверждения, например, описывать несуществующую патологию либо игнорировать редкий синдром, отсутствовавший в обучающей выборке. Проблема «чёрного ящика» – невозможность проследить логику вывода модели. Это снижает доверие врачей к системе и создаёт юридические риски при ошибочной диагностике [2].

Наконец, существует опасность деактивации клинического мышления: когда врач видит, что ИИ уже выделил «зону интереса» на снимке и предложил диагноз, возникает соблазн подписать заключение без дополнительной проверки. Это опасно, поскольку алгоритмы не учитывают клинический контекст – лихорадку, контакт с инфекционными больными, семейный анамнез или приём лекарств. Поэтому критически важен человеческий контроль на этапе верификации любых машинных предположений.

4. Трансформация роли врача

Внедрение ИИ не отменяет роль врача, а перераспределяет его задачи. Если раньше клиницист тратил значительную часть времени на рутинный анализ снимков и лабораторных данных – измерение объёмов, подсчёт клеток, поиск паттернов, – то теперь эти функции берёт на себя алгоритм. Врач же освобождается для более сложных задач: синтеза данных в целостную клиническую картину, принятия решений с учётом анамнеза и симптомов, а также общения с пациентом и объяснения диагноза. Подготовка таких специалистов требует включения в образовательные программы медицинских вузов дисциплин по медицинской информатике [4]. Более того перспективным направлением становится использование виртуальной реальности и симуляционных технологий на базе ИИ для отработки клинических навыков без риска для пациента [3].

Врачи будущего должны уметь работать с искусственным интеллектом, критически оценивать его результаты и интерпретировать «серые зоны» алгоритмов. Это важно, потому что ИИ меняет методы диагностики и профессиональные роли врачей. Алгоритмы помогают автоматизировать рутинные задачи, освобождая время для анализа и общения с пациентами. Внедрение больших языковых моделей меняет подход к коммуникации в медицине. Врачи должны уметь формулировать точные запросы к ИИ, проверять сгенерированные тексты и выявлять ошибки модели. Для этого в образовательные программы медицинских вузов нужно включать курсы по медицинской информатике и работе с ИИ [3,4].

Основные вызовы: борьба с предвзятостью данных, предотвращение гипердиагностики и сохранение клинического мышления. Будущее диагностики – это симбиоз скорости и точности ИИ с глубиной человеческого понимания. Перспективные направления: создание мультиэтничных обучающих наборов данных, разработка гибридных систем ИИ и экспертных правил, стандартизация проверки медицинских алгоритмов. Лабораторная диагностика также движется к автоматизации с помощью технологий компьютерного зрения [5].

**Библиографический список**

1. Васильев Ю.А., Решетников Р.В., Нанова О.Г. и др. Применение больших языковых моделей в лучевой диагностике: обзор предметного поля // Цифровая диагностика. – 2025. – Т. 6, № 2. – С. 268–285.

2. Костров С.А., Потапов М.П. Большие языковые модели в медицине: актуальные этические вызовы // Медицинская этика. – 2025. – № 2.

3. Горшков М.Д. Виртуальная реальность и искусственный интеллект в медицинском образовании. – Москва: РОСОМЕД, 2023.

4. Аджиева З.И., Кубанов М.Б., Аджиева Х.М. Цифровая трансформация здравоохранения: вызовы и новые возможности // Альманах «Крым». 2023. №40. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-zdravoohraneniya-vyzovy-i-novye-vozmozhnosti (дата обращения: 27.04.2026).

5. Евгина С.А., Гусев А.В., Шаманский М.Б., Годков М.А. Искусственный интеллект на пороге лаборатории. Лабораторная служба. 2022;11(2). URL: https://doi.org/10.17116/labs20221102118 (дата обращения: 27.04.2026).

© Гиззатуллина К.И., 2026

УДК 615.47

А.А. ГРАЧЕВ
*Artemgr04@mail.ru*
Науч. руковод. – ст. препод. кафедры БМИ Н.С. ИВАНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ УТЕЧЕК В ДЫХАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ АППАРАТА ИВЛ

*Аннотация*. В статье рассматриваются принципы проектирования микропроцессорной системы автоматизированной диагностики утечек в дыхательном контуре аппарата искусственной вентиляции лёгких. Представлен научно-технический подход к построению многоканальной измерительной сети на базе дифференциального анализа давления и контроля газовой смеси.

*Ключевые слова*: искусственная вентиляция лёгких (ИВЛ), диагностика утечек, дыхательный контур, датчики давления, медицинская техника.

Система искусственной вентиляции лёгких (ИВЛ) является критическим компонентом жизнеобеспечения в отделениях реанимации и интенсивной терапии, где бесперебойность и точность подачи дыхательной смеси напрямую определяют исход лечения пациента. Дыхательный контур современного респиратора представляет собой сложную пневматическую магистраль, включающую инспираторные и экспираторные шланги, фильтры, увлажнители, влагосборники и интерфейсы подключения к пациенту. В условиях круглосуточной эксплуатации, частых манипуляций медицинского персонала и

механических вибраций оборудования нарушение герметичности на любом из этих участков становится одной из наиболее распространённых технических неисправностей. Разгерметизация приводит к неконтролируемому падению рабочего давления, искажению минутного объёма вентиляции, нарушению синхронизации аппарата с дыхательными попытками больного и, как следствие, к риску развития гипоксии и вентилятор-ассоциированного повреждения лёгких.[1], [2]

Современные клинические руководства подчёркивают, что ключевая проблема заключается не в способности аппарата зафиксировать факт утечки, а в отсутствии встроенных средств её точной локализации. Штатные системы тревог большинства серийных моделей ИВЛ оперируют обобщёнными сообщениями: «Низкое давление контура», «Разгерметизация» или «Низкий минутный объём». Данные сигналы не указывают на конкретный сегмент магистрали. В экстренных клинических условиях врач или клинический инженер вынужден прибегать к ручному поиску неисправности, поочерёдно проверяя соединения, что отнимает критическое время и временно лишает пациента адекватной респираторной поддержки.[2]

Для устранения данного недостатка был применён системный инженерный подход, интегрирующий многоканальную сенсорику, дифференциальный алгоритм анализа и отказоустойчивую архитектуру управления.

Разработанная структурная схема системы диагностики представлена на рисунке 1.

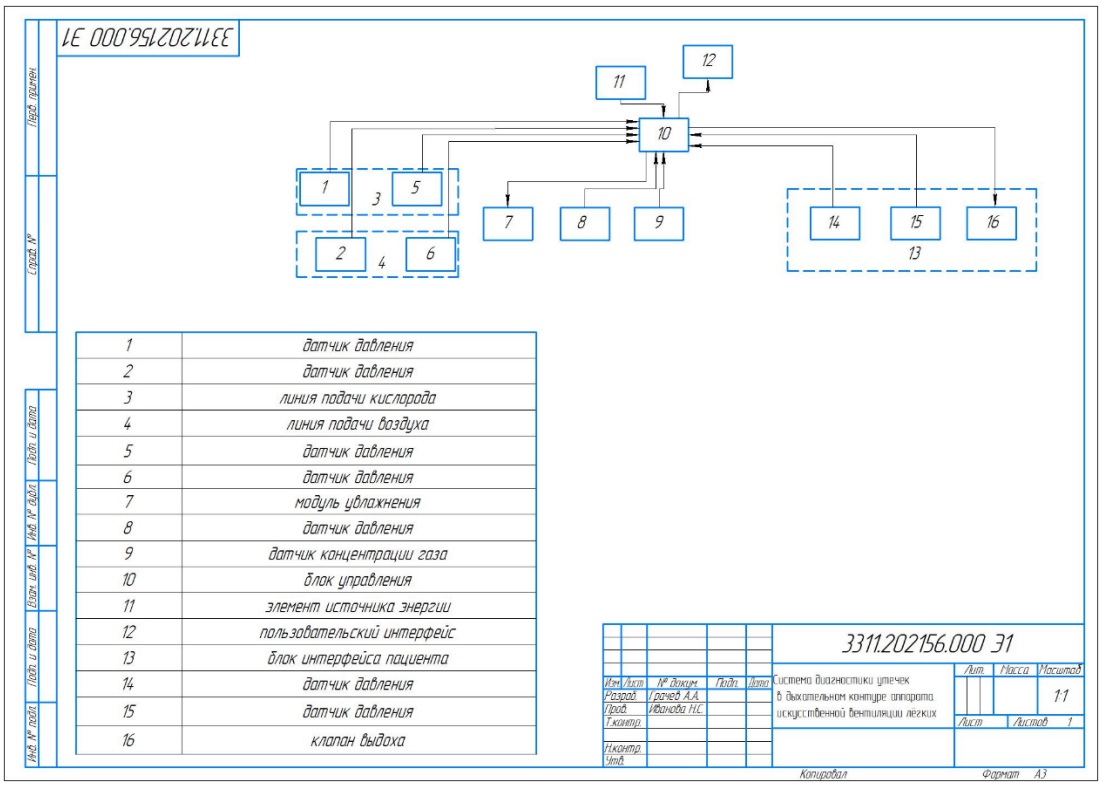



*Рис.1.* Структурная схема «Системы диагностики утечек в дыхательном контуре аппарата ИВЛ»

Архитектура устройства модульная и включает следующие функциональные блоки: измерительный сегмент (сеть цифровых датчиков давления и аналоговый газоанализатор), блок коммутации сигналов ($I^2C$-мультиплексор), цифровой управляющий комплекс на базе ARM-микроконтроллера, исполнительные и сигнальные устройства, а также многоуровневый блок бесперебойного питания. Разделение контура на независимые измерительные зоны (линии подачи кислорода и воздуха, модуль увлажнения, интерфейс) позволяет изолировать пневматические помехи и точно привязывать падение давления к конкретному физическому узлу магистрали.[3]

Поскольку используемые датчики давления имеют фиксированные аппаратные адреса, их прямое подключение к единой шине невозможно без конфликта адресации. Для решения этой задачи в схему интегрирован программируемый мультиплексор, который по команде ядра последовательно активирует отдельные каналы, обеспечивая изолированный опрос каждого сенсора с частотой до 400 кГц. Алгоритм обработки в реальном времени вычисляет разность давлений $\Delta P$ между парными точками каждого сегмента. При превышении калиброванного порога система классифицирует событие как локальную утечку, фиксирует временную метку и выводит код неисправного узла на графический дисплей оператора.[5]

Ядром вычислительного комплекса выбран 32-битный микроконтроллер STM32F405RGT6 на архитектуре ARM Cortex-M4. Его тактовая частота до 168 МГц и наличие аппаратного блока операций с плавающей точкой (FPU) позволяют реализовывать ресурсоёмкие алгоритмы цифровой фильтрации и интегрирования сигналов потока без задержек, критичных для систем жизнеобеспечения. Для обеспечения синхронизации и точности временных интервалов используется схема тактирования на внешнем кварцевом резонаторе 8 МГц с цепью фильтрации помех сброса.

Разработанная принципиальная схема аппаратной реализации системы представлена на рисунке 2.

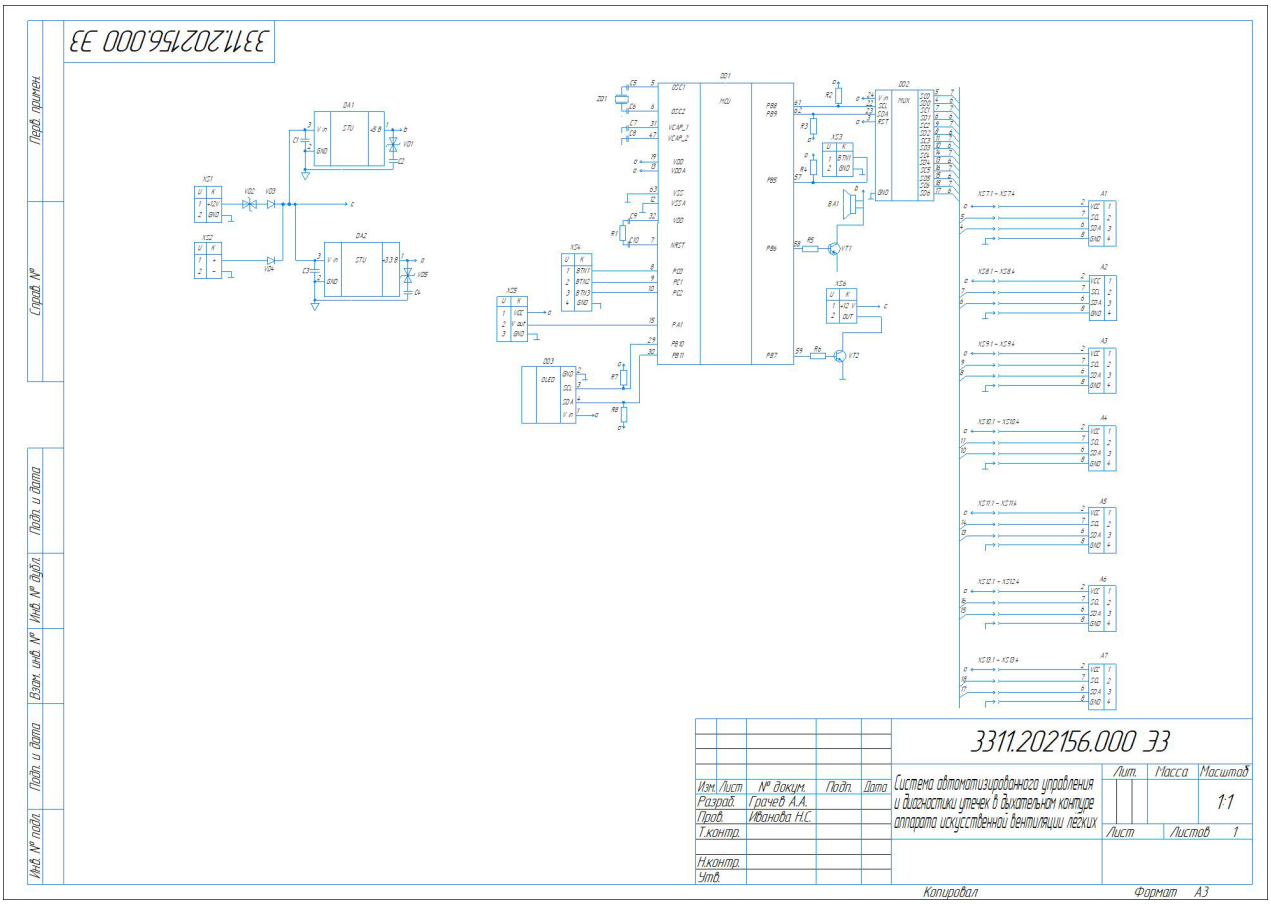



*Рис.2.* Принципиальная схема «Системы диагностики утечек в дыхательном контуре аппарата ИВЛ»

На ней детализированы цепи сопряжения аналоговых и цифровых сигналов, топология силовых ключей исполнительных механизмов и архитектура резервированного питания.[4], [5]

Аналоговый канал контроля газовой смеси реализован на базе электрохимического датчика концентрации кислорода. Выходной сигнал сенсора преобразуется встроенным АЦП микроконтроллера с разрядностью 12 бит. Для исключения ложных срабатываний от промышленных и медицинских электромагнитных помех в программное обеспечение внедрены алгоритмы скользящего среднего и пороговой гистерезисной обработки. При обнаружении критической разгерметизации или отклонения фракции вдыхаемого кислорода ($FiO_2$) активируется звуковая сигнализация, а управляющий электромагнитный клапан выдоха переводится в безопасное положение, предотвращая баротравму лёгочной ткани.[1]

Бесперебойность работы медицинского оборудования регламентируется строгими стандартами электробезопасности. Разработанная схема электропитания построена по принципу автоматического резервирования с использованием диодной сборки Шоттки, обеспечивающей мгновенное переключение между сетевым адаптером 12 В и литий-ионной аккумуляторной батареей без провалов напряжения. Дальнейшее преобразование выполняется

линейными стабилизаторами: шина +5 В формирует питание для силовой периферии, а LDO-регулятор на +3,3 В обеспечивает стабильный источник для микроконтроллера и прецизионных датчиков. Суммарная потребляемая мощность системы не превышает 1,44 Вт, что исключает необходимость активного охлаждения и соответствует требованиям к портативным диагностическим модулям.[3], [4]

Научный подход требует количественной оценки точности прибора. Погрешность измерительного тракта формируется из аддитивных (напряжение смещения, температурный дрейф, шумы квантования АЦП) и мультипликативных (нелинейность сенсоров, нестабильность коэффициентов усиления) составляющих. Шаг квантования 12-разрядного АЦП при опорном напряжении 3,3 В составляет $\Delta \approx 0{,}8$ мВ. Паспортная погрешность цифровых датчиков давления не превышает 1,5%, а аналогового газоанализатора — 2,0%. Суммарная расчётная погрешность системы, полученная методом среднеквадратичного сложения независимых ошибок, подтверждает соответствие метрологическим требованиям к диагностическим модулям респираторной техники: погрешность по каналу давления составляет ≤1,5%, по каналу концентрации кислорода — ≤2,0%.[1], [2]

Логика работы алгоритмов и временные характеристики системы были предварительно валидированы в среде имитационного моделирования. Цифровая модель подтвердила корректность пороговых сравнений, надёжность обработки дискретных входов органов управления и аварийной остановки, а также своевременность формирования управляющих импульсов на исполнительные механизмы. Моделирование переходных процессов при резком падении давления в одном из сегментов доказало отсутствие осцилляций в управляющем сигнале и детерминированность времени реакции системы, что является критическим параметром для клинической безопасности.[2], [5]

Внедрение системы автоматизированной диагностики кардинально трансформирует подход к техническому обслуживанию ИВЛ. Оператор получает точную навигационную подсказку с указанием неисправного узла, что сокращает время поиска и устранения утечки с десятков, минут до нескольких секунд. Постоянный сбор данных о динамике перепадов давления позволяет выявлять тенденцию к постепенному ослаблению соединений или образованию микротрещин, обеспечивая переход от реактивного ремонта к превентивному обслуживанию.[2], [4]

Таким образом, разработка устройства представляет собой результат системного инженерного анализа, где каждый блок выбран, рассчитан и интегрирован на основе научных данных, математических моделей и нормативных требований. Интеграция микропроцессорного управления, многоканальной сенсорики и отказоустойчивой архитектуры питания позволила создать компактное, энергоэффективное и метрологически обоснованное решение. Оно обеспечивает непрерывный сегментированный контроль дыхательного контура, минимизирует риски для пациента при

разгерметизации и снижает нагрузку на медицинский персонал, делая эксплуатацию аппаратов ИВЛ более безопасной, предсказуемой и соответствующей современным клиническим стандартам.

## Библиографический список


1. ГОСТ Р ИСО 80601-2-12–2014. Изделия медицинские электрические. Часть 2-12. Частные требования к основным аппаратам для медицинской вентиляции легких в отделениях интенсивной терапии. – М.: Стандартинформ, 2015. – 84 с.
2. Руководство по искусственной вентиляции легких / Под ред. В.В. Мороза, А.Н. Овчинникова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. – 896 с.
3. ГОСТ Р МЭК 60601-1-2010. Изделия медицинские электрические. Часть 1. Общие требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик. – М.: Стандартинформ, 2011. – 210 с.
4. Котельников Г.П., Миронов П.И. Медицинское приборостроение: учебное пособие для вузов. – М.: Логос, 2020. – 416 с.
5. Павлов В.Н., Сидоров А.В. Микропроцессорные системы в медицинской технике: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2020. – 312 с.


© Грачев А.А., 2026

УДК 543.426.1

Ш.Р. ЕРМАКОВА
*ermakovashaura1676@gmail.com*
Науч.руковод. – канд. техн. наук, доцент Л.Р. САЯПОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОТЛАДКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ФЛУОРИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ НЕОНАТАЛЬНОГО СКРИНИНГА

*Аннотация.* Статья посвящена вопросам схемотехнического проектирования и программной реализации управления флуориметрическим анализатором для неонатального скрининга. Описана модернизированная архитектура прибора на базе микроконтроллера STM32F103C8T6, включающая многоканальную систему питания с гальванической развязкой.

*Ключевые слова:* флуориметрический анализатор, неонатальный скрининг, STM32, программирование микроконтроллеров, генерация кода, SimInTech, схемотехника.

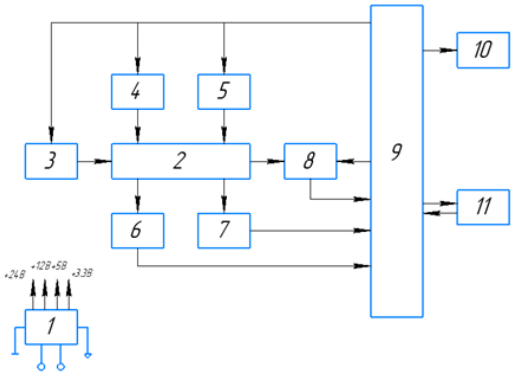
## Введение

Массовый неонатальный скрининг является важным инструментом профилактической педиатрии, позволяя выявлять наследственные болезни обмена веществ (НБО) на доклинической стадии. Ведущим методом лабораторной диагностики для количественного определения метаболитов в сухих пятнах крови служит флуориметрия, обеспечивающая чувствительность вплоть до $10^{-15}$ г/л. Несмотря на эффективность метода, высокая стоимость импортных анализаторов (мультимодальных ридеров и спектрофотометров) ограничивает их доступность для региональных учреждений здравоохранения, что делает актуальной разработку конкурентоспособных отечественных приборов.

Целью данной работы является не только расчет и проектирование принципиальной схемы флуориметра, но и создание отлаженной программной модели для верификации управляющей логики микроконтроллера.

## Аппаратная архитектура и схемотехнические решения

Разработанная структурная схема, представленная на рисунке 1, включает оптический тракт, периферию ввода-вывода и центральный управляющий модуль.




| | |
|---|---|
| 1 | Блок питания питания |
| 2 | Оптическая схема |
| 3 | Импульсный источник света |
| 4 | Система сканирования монохроматора возбуждения |
| 5 | Система сканирования монохроматора регистрации |
| 6 | Фотоприемник опорного канала |
| 7 | Фотоприемник канала фотометрии |
| 8 | Фотоприемник канала флюориметрии |
| 9 | Микропроцессорный контроллер |
| 10 | ЖК-дисплей |
| 11 | ПК |

*Рис. 1.* Структурная схема флуориметрического анализатора

В ходе проектирования принципиальной схемы, представленной на рисунке 2, были реализованы следующие ключевые инженерные решения:

Система питания с многоуровневым преобразованием: для обеспечения стабильности измерений и снижения помех блок питания реализован по каскадной схеме. Переменное напряжение сети (~230 В) преобразуется в +24 В блоком MPS-150W-24, далее DC/DC-преобразователи TDD15 формируют шины +12 В и +5 В. Питание цифрового ядра +3.3 В организовано через дополнительный конвертер AM1S-1203SZ, что минимизирует шумы на

аналоговой части. Суммарная потребляемая мощность прибора составляет 39,05 Вт.

Оптический и детекторный тракт: в качестве источника возбуждения выбрана импульсная ксеноновая лампа Hamamatsu L11946, работающая на частоте до 40 Гц с энергией вспышки 0,5 Дж. Управление лампой осуществляется через схему на полевом транзисторе VT1 (N-MOSFET IRFR420APBF) с ключа XS7. Регистрация эмиссии проводится фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) H11411 с низким темновым током (6 нА).

Согласование аналоговых сигналов: в тракте усиления применены прецизионные ОУ OP1177ARMZ. Неинвертирующий трансимпедансный усилитель DA1 рассчитан на работу с фототоком Iф1 до 200 мкА (коэффициент усиления 2.5). Усиленный сигнал поступает на вход АЦП микроконтроллера через делитель напряжения.

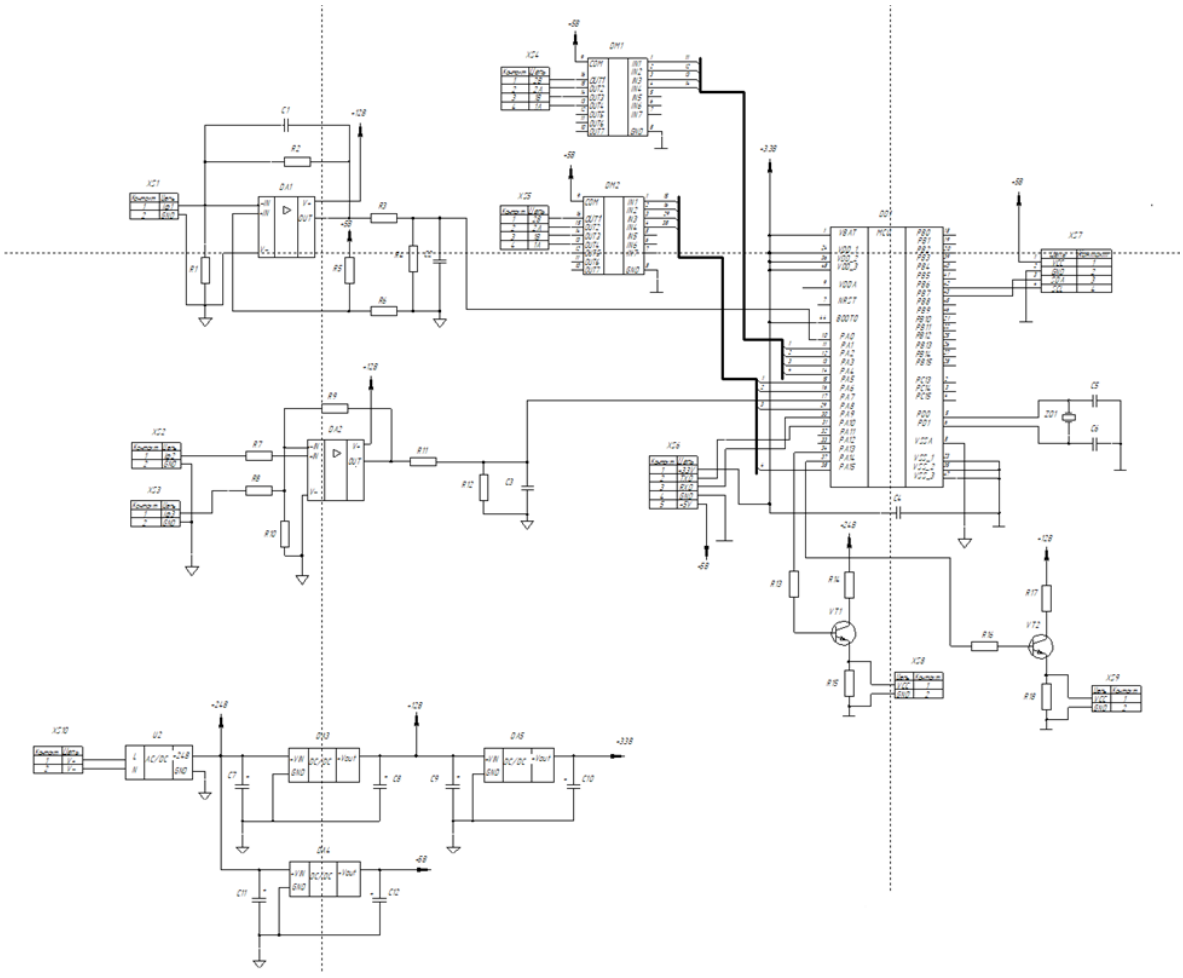


*Рис. 2.* Принципиальная схема флуориметрического анализатора

**Программная реализация и кодогенерация**

Для верификации логики управления и математической обработки сигналов была разработана модель в среде динамического моделирования SimInTech, конфигурация которой экспортирована в код для платформы Arduino/STM32. Схема модели представлена на рисунке 3.

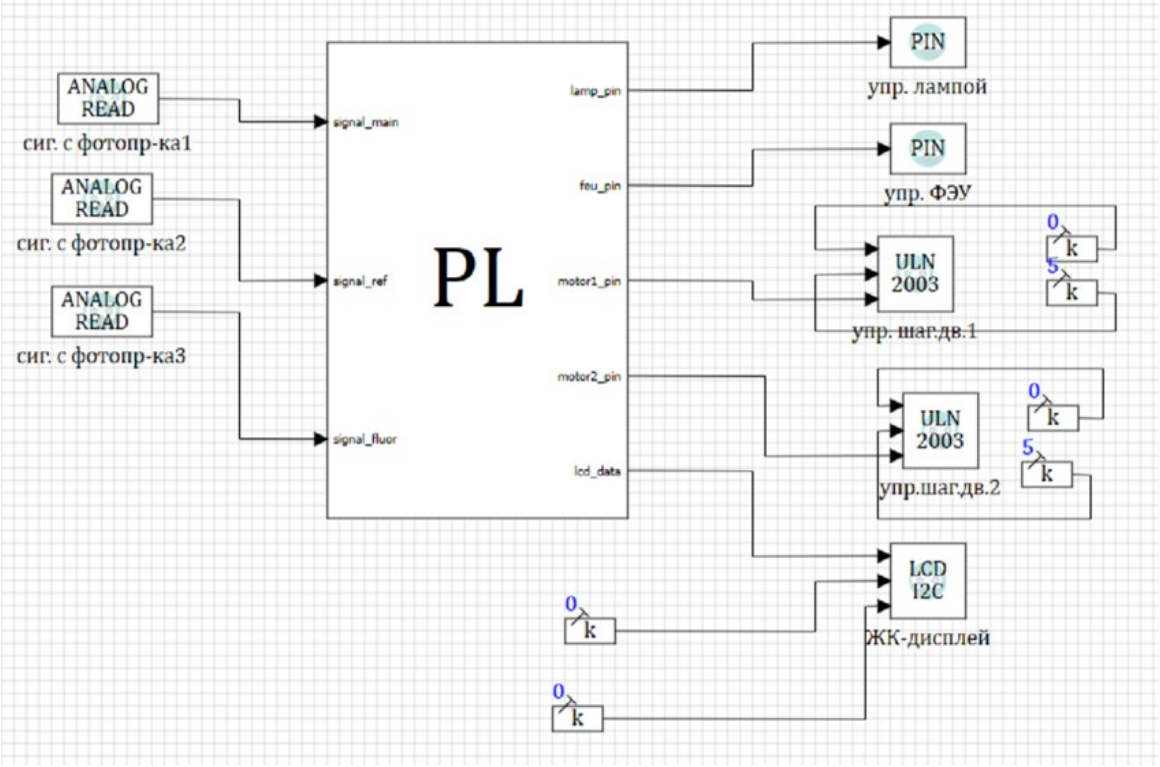



*Рис. 3.* Упрощенная схема подключения МК к периферийным устройствам

Модель позволила отладить взаимодействие следующих функциональных блоков до этапа трассировки печатных плат:

- Чтение аналоговых сигналов с портов analogRead() (каналы флуориметрии, опорный и фотометрии).
- Управление шаговыми двигателями 28BYJ-48 с помощью библиотеки CustomStepper. В сгенерированном коде реализовано управление направлением вращения (setDirection) и количеством шагов (rotateDegrees), что важно для точного позиционирования дифракционных решеток монохроматоров Mini-Chrom.
- Интерфейс взаимодействия с пользователем: в коде инициализирован дисплей (LiquidCrystal_I2C) для вывода результатов анализа.
- Генерация ШИМ-сигналов (analogWrite) для управления яркостью источника и калибровкой ФЭУ.

Скомпилированный код показал отсутствие ошибок в алгоритмах конечного автомата (switch (action)), что подтверждает корректность перехода системы между состояниями инициализации, обработки данных и остановки.

**Обсуждение и сравнительный анализ**

Разработанный флуориметрический анализатор обладает рядом конструктивных особенностей, которые выгодно отличают его от коммерческих аналогов при использовании в условиях ограниченного бюджета.

Во-первых, в отличие от мультимодальных ридеров типа PerkinElmer VICTOR Nivo или Fluoroskan Ascent FL, в которых используются дорогостоящие монохроматоры с микропроцессорным управлением и высокоскоростные системы смены фильтров, в данной работе применены компактные монохроматоры Mini-Chrom с ручным приводом, адаптированные под управление шаговыми двигателями 28BYJ-48. Это решение, наряду с использованием драйверов ULN2003, позволило радикально снизить стоимость системы сканирования спектра без критической потери точности: заявленная точность определения длины волны Mini-Chrom составляет ±0,2% от λ, что достаточно для рутинных скрининговых исследований.

Во-вторых, применение микроконтроллера STM32F103C8T6 на ядре ARM Cortex-M3 с тактовой частотой 72 МГц обеспечивает достаточную вычислительную мощность для обработки сигналов в реальном времени, одновременного управления двумя шаговыми двигателями и обмена данными с ПК по USB-UART интерфейсу (через конвертер CP2102). При этом стоимость микроконтроллера и его обвязки значительно ниже промышленных контроллеров, применяемых в серийных лабораторных приборах.

В-третьих, особое внимание в схемотехнике уделено электромагнитной совместимости и снижению шумов. Импульсный характер работы ксеноновой лампы (частота до 40 Гц) и наличие шаговых двигателей создают значительные электромагнитные помехи. Для их минимизации в схеме предусмотрено развязывание цепей питания: использование отдельных DC/DC-преобразователей для аналоговой (+12 В для ОУ, +24 В для лампы) и цифровой (+5 В и +3.3 В) частей. Кроме того, управление лампой и ФЭУ выведено на отдельные транзисторные ключи VT1 и VT2, что защищает микроконтроллер от высоковольтных наводок.

Метрологический анализ показал, что расчетная инструментальная погрешность прибора составляет около 1%. По данному параметру разработка сопоставима с лабораторными фотометрами среднего класса и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к оборудованию для биохимического скрининга. Основной вклад в погрешность вносят напряжение смещения операционных усилителей (0,5%) и шаг квантования 12-битного АЦП (0,024%).

Наконец, апробация управляющего кода в среде SimInTech с последующей генерацией Си-кода доказала жизнеспособность выбранной архитектуры управления без этапа дорогостоящего макетирования на ранних стадиях. Предложенная методика потоковой кодогенерации может быть рекомендована как универсальный подход к разработке встроенного ПО для биомедицинских микропроцессорных систем.

**Заключение**

В результате комплексного проектирования разработана схемотехническая и программная основа флуориметрического анализатора. Полученная принципиальная схема отличается продуманной системой стабилизации питания аналоговых цепей. Применение методологии кодогенерации позволило в автоматизированном режиме получить рабочий Си-код для управления периферией, что существенно сокращает время разработки встроенного ПО. Спроектированное устройство обладает расчетной погрешностью около 1% и может быть рекомендовано для внедрения в региональные лаборатории неонатального скрининга в рамках программ импортозамещения.

## Библиографический список

1. Воронин С.В., Куцев С.И. Неонатальный скрининг на наследственные заболевания в России: вчера, сегодня, завтра // Неонатология: новости, мнения, обучение. – 2022. – Т. 10, № 4 (38). – С. 7–16.

2. SimInTech. Интерфейс кодогенератора Си: справочная документация. – URL: https://help.simintech.ru/25_generaciya_koda/kodogenerator_Si/DAT_interfejs_kodogeneratora_C.html (дата обращения: 03.05.2026).

3. STMicroelectronics. STM32F103C8T6: ARM Cortex-M3 32-bit MCU Datasheet (DocID13587). – Rev. 17. – STMicroelectronics, 2024. – 97 p.

4. Hamamatsu Photonics K.K. Photosensor Module H11411: Technical Datasheet. – Hamamatsu, 2024. – URL: https://www.hamamatsu.com (дата обращения: 03.05.2026).

5. Hamamatsu Photonics K.K. 20 W Xenon Flash Lamp L11946: Technical Datasheet. – Hamamatsu, 2025. – URL: https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/light-and-radiation-sources/lamp/xe-f/20w/L11946.html (дата обращения: 03.05.2026).

© Ермакова Ш.Р., 2026

УДК 616-71

А.А. ЗАВОДЧИКОВ
*sasha.zavodchikov.04@mail.ru*
Науч. руководов. – ассистент кафедры БМИ, К.Р. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# К ВОПРОСУ ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ M2M-КОММУНИКАЦИИ ПРИ СОЗДАНИИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИСТОГО ПОМЕЩЕНИЯ В ОЖОГОВЫХ ЦЕНТРАХ

*Аннотация*. Рассматривается организация M2M-коммуникации в системе мониторинга чистых помещений для ожоговых центров. Описано взаимодействие микроконтроллера с Wi-модулем ESP-01S по протоколу UART с использованием AT-команд. Для обеспечения целостности данных предложено применение кадрирования и контрольной суммы CRC32.

*Ключевые слова*: IOT в медицине, CRC-32, ESP-01S.

Данная система актуальна для ожоговых центров, так как пациенты с ожогами лишены кожного барьера и подвержены высокому риску инфекций. Целью работы является организация надеждой M2M коммуникации при создании системы, обеспечивающей целостность и достоверность передаваемых данных. Датчики измеряют температуру, влажность, концентрацию частиц в воздухе, микроконтроллер опрашивает датчики, преобразует показания в строку данных и формирует команды для Wi-Fi модуля. Wi-Fi модуль получается данные через UART, соединятся с сервером по TCP, отправляет данные на сервер, при отклонениях сервер оповещает мед персонал. В случае выявления отклонений система мгновенно передаёт сигнал тревоги персоналу, что позволяет предотвратить развитие сепсиса и внутрибольничных инфекций. В данной конфигурации функциональную роль беспроводного шлюза выполняет модуль ESP-01S, тогда как основную часть прикладной логики, включая опрос датчиков, реализует главный микроконтроллер (в литературе-хост). Связь между хостом и ESP-01S организуется по асинхронному последовательному интерфейсу (UART). Физический уровень представляет собой двухточечное соединение: вывод TX (передатчик) хоста соединяется с выводом RX (приёмник) ESP-01S, вывод TX ESP-01S-с выводом RX хоста. Общая шина GND является обязательной для согласования уровней сигналов. Хост и ESP-01S должны быть предварительно сконфигурированы на идентичную скорость передачи; в большинстве практических реализаций для ESP-01S используется значение 115200 бит/с. Формат кадра-8 бит данных, 1 стоп-бит, бит чётности, как правило, отсутствует. Передача байта по UART асинхронна. Линия в состоянии покоя находится в логической единице. Стартовый бит (логический 0) обозначает

начало посылки, затем следуют биты данных (младшим битом вперёд), опциональный бит чётности и один или два стоповых бита (логическая 1). Приёмник синхронизируется по переднему фронту стартового бита и стробирует линию через фиксированные интервалы, кратные baud rate. Качественное различие между операциями записи (передача управляющих воздействий от хоста к ESP-01S) и чтения (приём данных от внешнего сервера через ESP-01S) не заложено в сам протокол UART. На данном уровне представлен лишь неструктурированный байтовый поток. Семантическая интерпретация достигается за счёт прикладного протокола, построенного поверх UART. В подавляющем большинстве случаев используется система AT-команд, где хост выступает в роли мастера, а ESP-01S – в роли слейва. Любой обмен инициируется хостом. В контексте этой системы запись – это отправка хостов в адрес ESP-01S строки, имеющей синтаксис AT-команды (например, AT+CIPSTART="TCP","example.com",80 или AT+CIPSEND=12). ESP-01S, приняв команду, выполняет соответствующее действие (установка TCP-соединения, подготовка буфера для отправки данных) и возвращает ответ: положительный (OK), отрицательный (ERROR) или промежуточный (например,>-приглашение к передаче данных). Хост воспринимает эти ответы как подтверждение того, что команда обработана, то есть операция записи завершена успешно или неуспешно. Если команда предполагала отправку полезной нагрузки (например, JSON-объекта на сервер), хост передаёт её следом после получения приглашения>. Чтение же инициируется не хостом, а удалённым сервером. В момент, когда ESP-01S получает из сети TCP-пакет, адресованный хосту, она асинхронно генерирует в свой канал TX строку с префиксом +IPD (сокращение от Incoming Packet Data). Формат строки стандартизован: +IPD,<conn_id>,<length>:<data>. Хост в фоновом режиме постоянно производит опрос приёмного буфера UART (или работает по прерыванию). При детектировании последовательности символов +IPD в начале очередной строки хост идентифицирует поступление внешних данных. Далее он парсит длину пакета и извлекает полезную нагрузку, следующую после двоеточия.[2][6]Таким образом, различение между чтением и записью достигается строго на уровне синтаксического анализатора протокола: если поступающая строка соответствует шаблону +IPD..., интерпретируется как чтение данных от сервера; если строка является одним из служебных ответов (OK, ERROR, SEND OK и т.д.) как служебный ответ на операцию записи. Дополнительным фактором, усложняющим процесс, является наличие режима эха (echo) в прошивке ESP-01S. При включённом эхе (команда ATE1) модуль ретранслирует в канал TX каждый байт, принятый от хоста. Следовательно, после отправки AT-команды хост сначала примет её копию (эхо), а затем подлинный ответ. Во избежание коллизий эхо рекомендуется отключать командой ATE0. Перейдём к вопросу обеспечения целостности данных. Канал UART в условиях реальной эксплуатации (наличие электродвигателей, реле, источников импульсных помех, значительная длина соединительных) не гарантирует сохранность передаваемых битов. Возможны как одиночные

инверсии битов, так и вставки или выпадения байтов из-за сбоя стартовой синхронизации. Для обнаружения подобных ошибок применяется механизм циклического избыточного кода (CRC). В рамках рассматриваемой системы уместно использовать 32-битную контрольную сумму (CRC32), полином которой (например, 0xEDB88320) обеспечивает высокую обнаруживающую способность – все пакетные ошибки длиной до 32 бит, а также любые ошибки с нечётной кратностью. Алгоритм применения CRC32 в связке хост – ESP-01S требует надстройки поверх стандартного AT-протокола, поскольку нативный поток байтов AT-команд не содержит контрольных сумм. Типичное решение – кадрирование. Полезная нагрузка (например, массив показаний датчиков или управляющая команда) предваряется маркером начала кадра (Start-of-Frame, SOF), за которым следует поле длины и собственно данные. В конце вычисляется CRC32 от поля данных и дописывается в кадр. [3]Приёмная сторона получает кадр, извлекает данные, пересчитывает CRC32 и сравнивает с переданным. Совпадение указывает, что данные не были искажены в канале и что кадр семантически корректен – то есть не потерян стартовый бит и не произошло сдвига тактовой синхронизации. Несовпадение является основанием для игнорирования данного кадра и, в зависимости от протокола, для запроса повторной передачи (отрицательное квитирование, NAK). Важно отметить, что CRC32 обеспечивает только детекцию случайных ошибок на физическом уровне и не предоставляет криптографической защиты. Злоумышленник, имеющий физический доступ к линии UART, может произвольно модифицировать данные и пересчитать контрольную сумму, и эта подделка не будет обнаружена. Для защиты от целенаправленных атак необходимо использование криптографических механизмов более высокого порядка – например, шифрованного канала TLS между ESP-01S и конечным сервером или имплементация HMAC на основе разделённого секретного ключа внутри прикладного протокола между хостом и сервером. [4] [5]

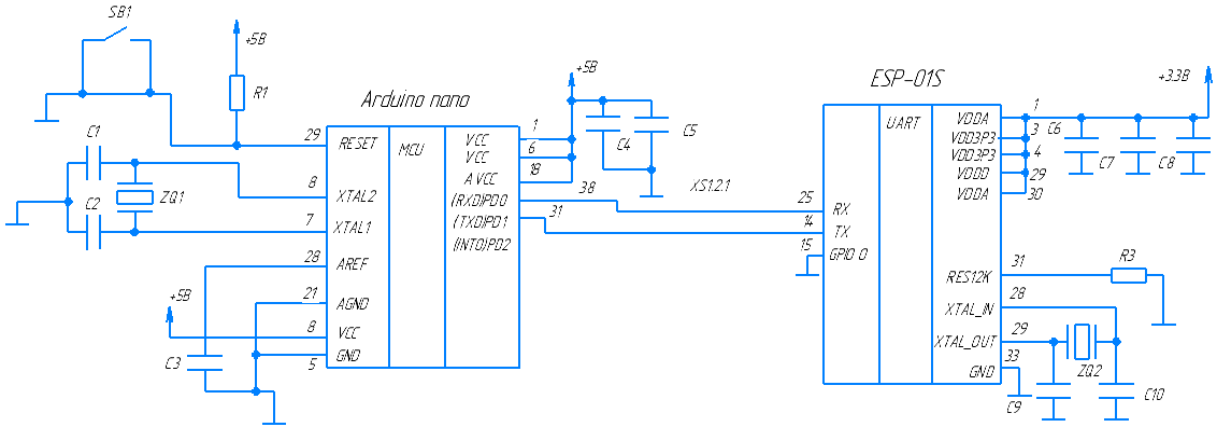



*Рис. 1.* Подключение Wi-Fi модуля к микроконтроллеру [1]

Подводя итоги, в статье реализованы задачи организации надежной M2M-коммуникации в системе контроля параметров чистого помещения для ожоговых центров: обосновано применение связки микроконтроллера с

Wi-модулем ESP-01S по протоколу UART с использованием AT-команд, а для обеспечения целостности и достоверности передаваемых данных предложено кадрирование с контрольной суммой CRC32. Разработанные решения позволяют непрерывно контролировать параметры чистой среды, своевременно оповещать медицинский персонал об отклонениях и тем самым снижать риск внутрибольничных инфекций у пациентов с ожогами.

## Библиографический список


1.Arduino Nano. Product Overview [Электронный ресурс] // ChipDIP. - Режим доступа: https://static.chipdip.ru/lib/673/DOC038673424.pdf (дата обращения: 27.04.2026).

2.ESP-01 WiFi Module. Datasheet Version 1.0 [Электронный ресурс] / Ai-Thinker Team. - Режим доступа: https://teplo-energetika.ru/instruktion/arduino-chip/esp-01-datasheet.pdf (дата обращения: 27.04.2026).

3.ESP8266 AT команды v0.22 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://esp8266.ru/esp8266-at-commands-v022/ (дата обращения: 29.04.2026).

4.Мальчуков А.Н., Осокин А.Н. Исследование программных реализаций алгоритмов вычисления CRC, совместимых с PKZIP, WinRAR, Ethernet [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. - Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-programmnyh-realizatsiy-algoritmov-vychisleniya-crc-sovmestimyh-s-pkzip-winrar-ethernet/viewer (дата обращения: 29.04.2026).

5.Мыцко Е.А., Мальчуков А.Н. Исследование программных реализаций табличного и матричного алгоритмов вычисления контрольной суммы CRC32 [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. - 2011. - № 1 (1). - С. 273–278. - Режим доступа: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/14937/1/105.pdf (дата обращения: 01.05.2026).

6.Управление Wi-Fi модулем ESP-01 с компьютера при помощи AT-команд [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. - Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-wi-fi-modulem-esp-01-s-kompyutera-pri-pomoschi-at-komand/viewer (дата обращения: 28.04.2026).


© Заводчиков А.А., 2026

УДК 615.471

М.У. ЗАКИРЗЯНОВ
*auditoremarat@gmail.com*
Науч. руковод. – ст. преподаватель кафедры БМИ Н.С. ИВАНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АППАРАТА МАГНИТОЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ С СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ

*Аннотация*. В работе представлены результаты разработки имитационной модели аппарата магнитолазерной терапии с системой контроля параметров воздействия в среде динамического моделирования SimInTech. Описаны структурные элементы модели: блоки ввода сигналов (имитация кнопок, потенциометров и датчиков), блок обработки (микроконтроллер с реализованным алгоритмом управления) и блоки вывода (исполнительные устройства).

*Ключевые слова:* магнитолазерная терапия; имитационное моделирование; SimInTech; система контроля параметров; микроконтроллер; алгоритмы управления; медицинская техника.

Разработка современных медицинских аппаратов, в том числе для магнитолазерной терапии, требует тщательной отработки алгоритмов управления и проверки систем безопасности. Изготовление физического прототипа на ранних этапах связано с высокими затратами времени и средств. Альтернативным подходом является имитационное моделирование — метод, позволяющий исследовать поведение проектируемого устройства в виртуальной среде, оперативно вносить изменения и проверять реакцию системы на различные сценарии работы [1].

В данной работе представлена имитационная модель аппарата магнитолазерной терапии с системой контроля параметров воздействия, разработанная в программном комплексе SimInTech, который хорошо зарекомендовал себя для моделирования динамических систем, в том числе в области биомедицинской техники [5].

Разработанная модель построена по модульному принципу и включает три основных функциональных блока: блок ввода сигналов, блок обработки (микроконтроллер) и блок вывода управляющих сигналов (рис. 1).

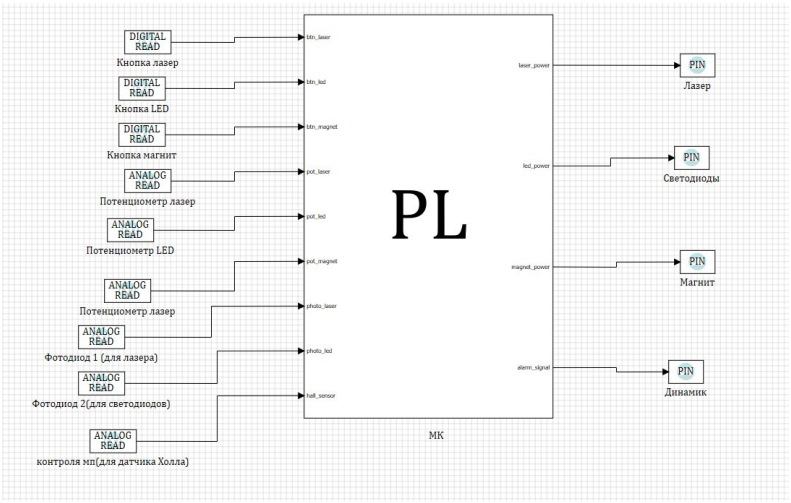



*Рис. 1. Схема имитационной модели аппарата МЛТ в среде SimInTech*

Блок ввода сигналов имитирует органы управления и датчики обратной связи. В его состав входят: кнопки для включения и выключения лазера, светодиодов и магнита; потенциометры для плавной регулировки мощности лазера, яркости светодиодов и интенсивности магнитного поля; модели фотодиодов, контролирующих наличие излучения лазера и свечение светодиодов; модель датчика Холла, отслеживающего величину магнитного поля.

Блок обработки представляет собой виртуальную модель микроконтроллера, реализованную на встроенном языке программирования SimInTech. Этот блок выполняет все функции реального управляющего устройства: считывает сигналы с кнопок и потенциометров, преобразует и масштабирует их, формирует управляющие сигналы для исполнительных устройств, анализирует сигналы обратной связи с датчиков и реализует алгоритмы проверки безопасности [4].

Блок вывода преобразует управляющие сигналы, сформированные микроконтроллером, в воздействия на модели исполнительных устройств. Выходными сигналами являются мощность лазерного излучения, яркость свечения светодиодов, интенсивность магнитного поля, а также аварийный сигнал тревоги, который поступает на блоки звуковой и световой индикации.

Логика работы алгоритма управления, заложенная в модель микроконтроллера, обеспечивает полный цикл управления аппаратом:

Регулирование параметров воздействия. Сигналы с потенциометров, значения которых лежат в определённом диапазоне, поступают на вход микроконтроллера. Встроенное программное обеспечение преобразует эти значения в управляющие сигналы, пригодные для широтно-импульсной модуляции. Это позволяет плавно изменять мощность лазера, яркость светодиодов и силу магнитного поля простым поворотом ручек потенциометров.

Включение и отключение воздействий. Аппарат позволяет независимо управлять каждым из трёх терапевтических факторов. Если кнопка включения

того или иного воздействия не нажата, соответствующий управляющий сигнал на выходе микроконтроллера устанавливается в нулевое значение, независимо от положения потенциометра. Это исключает случайное включение излучения или магнитного поля при настройке прибора. При нажатии кнопки управляющий сигнал начинает транслироваться на исполнительное устройство, и параметр воздействия определяется положением потенциометра [2].

Система контроля параметров и обеспечения безопасности. Ключевой особенностью разработанной модели является наличие многоуровневой системы контроля, которая непрерывно отслеживает фактическое состояние излучателей и магнитного поля по сигналам обратной связи.

Контроль наличия воздействия. После того как пользователь включил, например, лазер, система ожидает подтверждения от соответствующего фотодиода. Если фотодиод не фиксирует излучение (например, из-за неисправности лазера или нарушения оптического контакта), формируется аварийный сигнал первого уровня. Этот сигнал информирует оператора о том, что предписанное воздействие фактически не осуществляется. Важно отметить, что сам лазер при этом не отключается, так как проблема может быть связана не с самим излучателем, а с цепью контроля. Аналогичным образом контролируется работа светодиодов по сигналу второго фотодиода и работа магнита по сигналу датчика Холла [3].

Критическая аварийная защита. В алгоритм заложена также логика предотвращения опасных ситуаций, связанных с превышением допустимых уровней воздействия. Система непрерывно сравнивает текущие значения с пороговыми, установленными как безопасные. Если уровень излучения или магнитного поля превышает заданный предел, модель мгновенно отключает все исполнительные устройства: лазер перестаёт генерировать, светодиоды гаснут, а магнитное поле исчезает. Одновременно с этим формируется критический аварийный сигнал второго уровня, который требует незамедлительного вмешательства оператора.

## Библиографический список

1. Куликов, А. Г. Магнитолазерная терапия: руководство для врачей / А. Г. Куликов, С. Л. Носова. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2019. – 208 с.

2. Чирков, А. Ю. Магнитолазерная терапия в клинической практике / А. Ю. Чирков. – Москва : Медицинская книга, 2021. – 176 с.

3. Котляр, Ю. Ф. Аппараты физиотерапии и принципы их действия / Ю. Ф. Котляр. – Санкт-Петербург : СпецЛит, 2020. – 158 с.

4.Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.

5. Методические материалы по работе в среде SimInTech [Электронный ресурс] – URL: https://simintech.ru (дата обращения: 15.04.2026)

© Закирзянов М.У., 2026

УДК 616.12

Е.Н. ИВАНОВА
*yelizaveta_ivanova_0708@mail.ru*
Науч. руководитель – ассистент кафедры Д.Ш. БАГАУТДИНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ОБЗОР МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

*Аннотация.* Статья посвящена анализу мобильных приложений, предназначенных для контроля артериального давления. Рассматриваются функциональные возможности наиболее распространенных платформ. Описаны ключевые характеристики каждого приложения, их преимущества и ограничения. Особое внимание уделено вопросам точности измерений и интеграции с медицинскими устройствами.

*Ключевые слова*: артериальное давление, мобильное приложение, тонометр, непрерывный мониторинг, сердечно-сосудистые заболевания, цифровое здравоохранение, персонализированная медицина.

В современном мире артериальная гипертензия относится к числу самых распространенных хронических заболеваний в мире. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, ею страдают более 1,28 миллиарда человек. Нерегулярный контроль артериального давления представляет собой один из ключевых факторов, обуславливающих прогрессирование заболевания и развития осложнений, как инсульт, инфаркт, миокард и почечная недостаточность [2].

В отношении ситуации, сложившейся в РФ, по данным Министерства здравоохранения Российской Федерации, артериальная гипертензия диагностирована примерно у 44% взрослого населения страны. При этом, лишь около половины указанных пациентов регулярно измеряют давление в перерывах между визитами к врачу [3]. Традиционно рекомендованный кардиологами бумажный дневник самоконтроля, на практике заполняется нерегулярно, а данные в нем нередко оказываются неполными или недостоверными.

В данном контексте особую значимость приобретают технологии мобильного здравоохранения (mHealth), обеспечивающие возможность самостоятельного мониторинга состояние сердечно-сосудистой системы в домашних условиях. Мобильные приложения для контроля артериального давления стали доступным инструментом как для пациентов с установленным диагнозом, так и для людей из группы риска. В настоящее время на рынке представлен широкий спектр подобных приложений.

С целью обеспечения объективности анализа каждое приложение оценивалось по единой системе критериев, охватывающей как технические, так и практические аспекты применения. С технической точки зрения рассматривались поддерживаемые операционные системы (iOS и Android), тип интеграции с измерительными устройствами (автоматическая синхронизация по Bluetooth или ручной ввод), точность передачи данных и наличие функции выявления патологических состояний, в частности нерегулярного сердцебиения.

С практической точки зрения анализировались доступность приложения для скачивания на территории России (App Store, Google Play, RuStore), наличие русскоязычного интерфейса, модель монетизации, а также политика хранения и обработки персональных данных в контексте требований российского законодательства, прежде всего Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных» [1].

Наибольшую практическую ценность для российских пользователей представляет экосистема Omron Connect - официальное мобильное приложение японской компании Omron Healthcare, занимающей одну из лидирующих позиций на мировом рынке бытовых тонометров. Приложение предназначено исключительно для работы с тонометрами Omron, оснащёнными модулем Bluetooth. После каждого измерения прибор автоматически передаёт данные на смартфон, где они сохраняются в хронологическом дневнике с указанием времени, даты и значений систолического, диастолического давления и частоты пульса. Пользователю доступен просмотр графиков за произвольный период, а также формирование PDF-отчетов для предоставления лечащему врачу [4].

Тонометры Omron серий M2, M3, M6, M7 и других официально реализуются на территории РФ — в аптечных сетях, магазинах медицинской техники и на маркетплейсах — по цене от 2500 до 8000 рублей в зависимости от модели. Приложение Omron Connect доступно для загрузки как в App Store, так и в Google Play на территории России и обладает полноценным русскоязычным интерфейсом. Это делает экосистему Omron одной из самых доступных и понятных для широкой аудитории.

Главным недостатком данной системы является жёсткая привязка к экосистеме Omron. В случае использования тонометра другого производителя (A&D, Microlife, Beurer и другие), Omron Connect становится невозможным. Аналитика в приложении относительно базовая, так отсутствует оценка сердечно-сосудистого риска по международным шкалам, нет инструментов выявления утренней гипертензии или вариабельности давления в динамике. Данные хранятся на серверах Omron, расположенных за пределами России, что формально создаёт коллизию с требованиями ФЗ-152 о локализации данных граждан РФ.

Далее рассмотри приложение Withings разработанное французской компанией, рассчитанное на работу с линейкой их устройств. Наиболее технологически продвинутым является тонометр BPM Core, совмещающий функции измерения артериального давления, снятия ЭКГ и анализа сигнала на

предмет мерцательной аритмии в одном компактном устройстве. Приложение интегрируется с платформами Apple Health и Google Fit, обеспечивая агрегацию данных из различных источников в единый профиль здоровья [5].

Анализ применимости устройств в России, выявид ключевую проблему. После 2022 года официальные поставки устройств Withings в Россию фактически прекратились. В российской рознице тонометры BPM Connect и BPM Core практически прекратились, их можно приобрести лишь через параллельный импорт по ценам от 12 000 рублей и выше — при том, что официальная европейская цена BPM Connect составляет около 100 евро. Само приложение Health Mate формально доступно для скачивания, однако без оборудования Withings его функциональность по контролю давления недоступна. Вместе с тем, при наличии устройства Withings это один из наиболее продуманных и визуально привлекательных интерфейсов среди всех рассматриваемых приложений. Графики и тренды отображаются наглядно, система анализирует долгосрочную динамику и предупреждает об отклонениях. Функция ЭКГ и выявления аритмии в BPM Core выводит возможности домашнего тонометра на качественно новый уровень, приближая его по функционалу к медицинским устройствам.

QardioHeart Health — приложение американской компании Qardio, разработанное в сотрудничестве с кардиологами и изначально ориентированное на клиническое применение в рамках телемедицины. Работает в связке с тонометром QardioArm — компактным устройством в форме манжеты, подключающимся к смартфону по Bluetooth. Ключевая особенность заключается в автоматическом выявление нерегулярного сердцебиения в процессе каждого измерения, что является клинически значимой функцией для пациентов с риском мерцательной аритмии. Приложение поддерживает режим врачебного доступа: лечащий специалист имеет возможность в реальном времени просматривать историю измерений пациента через защищённый онлайн-портал, не ожидая очного визита [6].

Анализ функциональных преимуществ, рассматриваемых решений позволяет отметить, что телемедицинская модель, реализованная в QardioHeart Health, является наиболее проработанной среди рассматриваемых приложений. Врач имеет возможность просматривать данные пациента онлайн, может оставлять комментарии и корректировать рекомендации дистанционно. Это принципиально важно для пациентов с тяжёлой гипертензией, пожилых людей с ограниченной мобильностью, а также для жителей отдалённых районов. Функция выявления аритмии добавляет диагностическую ценность, выходящую за рамки простого мониторинга давления.

Однако, стоит учесть, что ситуация аналогична Withings, так официальные поставки тонометра QardioArm в Россию прекращены. Устройство стоит около 100–120 долларов США и доступно только через зарубежные интернет-магазины или сервисы параллельного импорта. Само приложение можно установить, однако без фирменного тонометра его функциональность

полностью недоступна. Интерфейс выполнен на английском языке — русскоязычная локализация отсутствует.

В заключении рассмотрим SmartBP — универсальный цифровой дневник артериального давления, не привязанный к конкретному производителю оборудования. Приложение поддерживает как ручной ввод данных от любого тонометра, так и автоматическую синхронизацию с рядом совместимых Bluetooth-моделей. Предоставляет развёрнутую статистику среднего давления за различные периоды, анализ утренней гипертензии, оценку вариабельности, а также динамику пульсового давления. Реализована оценка сердечно-сосудистого риска в соответствии с рекомендациями Американской ассоциации кардиологов (AHA) и Американского колледжа кардиологов (ACC) [7].

SmartBP доступно для загрузки в App Store и Google Play на территории России. Принципиальное преимущество приложения является полная независимость от конкретного оборудования. Пользователь может вводить показания вручную с любого тонометра, к примеру российского производства, Omron, A&D, Microlife, Beurer или иного. Это особенно ценно в условиях, когда ассортимент совместимых Bluetooth-устройств в России ограничен.

По богатству аналитических инструментов SmartBP превосходит все остальные рассматриваемые приложения. В нем реализована функция выявления утренней гипертензии — состояния, при котором давление резко повышается в первые часы после пробуждения и является самостоятельным фактором риска инсульта. Приложение формирует детализированные отчёты, пригодные для предъявления кардиологу, и поддерживает экспорт данных в форматах CSV и PDF. Предусмотрено ведение нескольких профилей пользователей. Однако, ключевым недостатком приложения является отсутствие полноценного русскоязычного интерфейса, что создает существенный барьер для пожилых пользователей, которые составляют основную аудиторию приложений для контроля давления. Расширенные аналитические функции, включая подробные отчёты и оценку риска, доступны только в платной версии — подписка стоит порядка 300–400 рублей в месяц или около 1 500–2 000 рублей в год. Автоматическая синхронизация поддерживается не со всеми моделями тонометров, представленных в российской рознице.

Проведенный анализ позволяет выявить ряд ключевых преимуществ мобильных приложений для контроля давления, которые в равной мере относятся ко всем рассматриваемым платформам:

1. Приложение снимает с пользователя необходимость вести бумажный дневник, устраняя ошибки ручной записи и обеспечивая хранение полной истории измерений с точной временной привязкой;

2. Визуализация данных в виде графиков за день, неделю, месяц и более длительные периоды позволяют врачу и пациенту увидеть тенденции, которые невозможно уловить по отдельным измерениям;

3. Функция напоминаний систематически побуждает пользователя к регулярным измерениям;

4. Возможность экспорта данных в PDF сокращает время врачебного приёма и позволяет специалисту опираться на объективные данные, а не на субъективные воспоминания пациента.;

5. Ряд приложений позволяет организовать дистанционный мониторинг, что особенно актуально для жителей малых городов и сельской местности с ограниченным доступом к кардиологической помощи.

Вместе с тем существует ряд ограничений, которые необходимо учитывать при практическом применении. Так, большинство приложений функционируют исключительно внутри экосистемы одного производителя, что привязывает пользователя к конкретному бренду оборудования и лишает его свободы выбора. Кроме того, все рассмотренные иностранные приложения хранят данные на зарубежных серверах, что создаёт правовую коллизию с российским законодательством о локализации персональных данных.

На сегодняшний день для большинства российских пользователей оптимальным решением является приобретение сертифицированного Bluetooth-тонометра Omron и использование его в связке с приложением Omron Connect. Это проверенное, доступное по цене, клинически точное и полностью русскоязычное решение для ежедневного домашнего мониторинга. Однако, для пользователей готовых работать с англоязычным интерфейсом, — оптимальным выбором является SmartBP с ручным вводом данных от любого имеющегося тонометра. Платная подписка при систематическом использовании вполне оправдана качеством аналитических инструментов.

Таким образом, мобильные приложения для контроля артериального давления представляют собой полезный инструмент мониторинга, способный существенно повысить приверженность пациентов к лечению и улучшить качество контроля гипертензии [8]. Однако их практическая применимость в России в 2026 году существенно ограничена.

Из рассмотренных решений реально доступными и функционально пригодными для российского пользователя являются два: Omron Connect — как наиболее удобное, бесплатное и русскоязычное решение при наличии тонометра Omron, и SmartBP — как наиболее аналитически богатый универсальный дневник, не зависящий от производителя оборудования. Withings Health Mate, QardioHeart Health недоступны для большинства российских пользователей по причинам, не связанным с качеством самих продуктов.

Сложившаяся ситуация наглядно демонстрирует необходимость развития отечественных mHealth-платформ, которые сочетали бы клиническую точность, удобный интерфейс, соответствие российскому законодательству о персональных данных и интеграцию с государственными медицинскими информационными системами. Именно в этом направлении лежит путь к масштабному и юридически корректному внедрению цифровых технологий контроля давления в российскую медицинскую практику.

**Библиографический список**

1. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных». URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 01.04.2025).
2. World Health Organization. Hypertension. Key facts. — URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hypertension (дата обращения: 01.04.2025).
3. Министерство здравоохранения Российской Федерации. Государственный доклад о состоянии здоровья населения Российской Федерации. — URL: М., 2023. https://minzdrav.permkrai.ru/novosti/?id=161038.
4. Omron Healthcare. Omron Connect App overview. — URL: https://www.omron-healthcare.com/en/omron-connect (дата обращения: 01.04.2025).
5. Withings. Health Mate and BPM product line. — URL: https://www.withings.com (дата обращения: 01.04.2025).
6. Qardio Inc. QardioHeart Health clinical features. — URL: https://www.getqardio.com (дата обращения: 01.04.2025).
7. SmartBP — Blood Pressure Log. App Store / Google Play. — URL: https://smartbp.app (дата обращения: 01.04.2025).
8. Kario K. et al. Digital hypertension 2020: Literature overview and framework. Hypertension. — 2020. — Vol. 76. — P. 640–650.

© Иванова Е.Н., 2026

УДК 614.2

У.В. ИВАНОВА
*Iva.Ulya2002@yandex.ru*
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент Ю.О. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ КАРТЫ ПОТОКА ЦЕННОСТЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МЕДИЦИНСКОМУ УЧРЕЖДЕНИЮ УФЫ

*Аннотация*. В статье представлена методика создания карты потока ценностей (КПЦ), адаптированная для условий конкретного медицинского учреждения. Описаны этапы анализа текущих процессов, выстроены цепочки процессов и представлена сама карта потока ценностей.

*Ключевые слова*: карта потока ценностей (КПЦ), бережливое здравоохранение, карта, медицинское учреждение, внедрение, эффективность, схема

Методика создания карты потока ценностей основывается на методических рекомендациях Министерства здравоохранения Российской

Федерации «Применение методов бережливого производства в медицинских организациях. Открытие проектов по улучшениям.» [1] и «Применение методов бережливого производства в медицинских организациях. Поток создания ценности. Картирование. Начальный уровень.» [2].

На первом этапе строится карта текущего состояния. Она включает в себя процесс сбора информации о текущем положении дел в медицинском учреждении. Происходит подготовительная работа, а именно фиксация выявленных проблем, потерь, «узких мест» [2].

Согласно собранным данным в ходе анализа текущего состояния рассматриваемой организации выявлены следующие проблемы:

- проблема с отправкой результатов анализов. Проблема состоит в том, что результаты анализов стали поступать без указания ФИО пациентов, что может приводить к некорректной обработке анализов и приводить к неверному лечению.

- некомпетентность и некачественное обслуживание в регистратуре. Выявлено, что сотрудники некорректно выполняли свои должностные обязанности, а именно не отправляли запросы в страховые компании, выдавали неверную информацию. Проблема также выявлена с записью по телефону в связи с очередью в регистратуру.

- проблема с организацией приема и обработки запросов. Обнаружена проблема при замене врача (например, из-за больничного) пациенты сталкиваются с трудностями в получении дальнейшей информации о лечении.

Построение карты текущего состояния включает в себя следующие шаги [3]:

Первый шаг. Обозначение на карте наименование рассматриваемого процесса.

Второй шаг. Построение последовательности операции, схематичное представление основных стадий процесса. При составлении карты текущего состояния ПСЦ с визуализацией шагов картируемого потока каждая операция потока представляется в виде прямоугольника с подписью, раскрывающей проводимые действия с указанием места их реализации.

Третий шаг. Нанесение линии движения от одного процесса к другому. Если маршрутов движения несколько, необходимо нанести их все.

Четвертый шаг. Отображение на карте ПСЦ продолжительности каждого элемента, операции, манипуляции, длительность и дальность перемещений. На карту наносятся минимальная и максимальная продолжительность каждой операции в процессе, время ожидания и выявленные избыточные запасы (например, очередь).

Пятый шаг. Вычисление времени протекания процесса. Время протекания процесса высчитывается как сумма времени всех операций с добавлением времени ожидания, переходов с одной операции на другую. Минимальные и максимальные показатели времени суммируются отдельно. Таким образом, на карте ПСЦ отображается минимальное и максимальное время протекания процесса.

Шестой шаг. Выявление и нанесение на карту действия, не создающие ценности (потери), в соответствии с классификацией видов потерь. Схематично шаги отображены на рис. 1.




*Рис. 6*. Шаги построения текущего состояния потока создания ценностей

После обнаружения проблем требуется анализ причин из появления, отбор наиболее эффективных методов их устранение, что приводит к следующему этапу.

На втором этапе строится карта целевого состояния. Она отображает цепочки процессов в организации, где каждый этап процесса должен по возможности производить только то, что нужно пациентам, и тогда, когда это им нужно [3].

Карта целевого потока составляется таким же образом, как и карта текущего состояния, различие заключается в отсутствии на карте целевого состояния потерь и проблем. Области, требующие улучшений, обозначаются на карте символом кайдзен-вспышки. Для каждого улучшения формируется план действий с ответственными лицами и сроками.

При построении обеих карт используются определенные символы, которые также представлены в методических рекомендациях Министерства здравоохранения Российской Федерации. Символы представлены на рисунке 2.

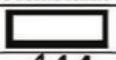
| № п/п | Термин | Обозначение | Описание |
|---|---|---|---|
| 1 | Операция |  | Используется для обозначения операций процесса |
| 2 | Вход/выход |  | Используется для обозначения границ процесса |
| 3 | Направление материального потока |  | Используется для обозначения перемещения людей и предметов по потоку создания ценности |
| 4 | Запасы |  | Используется для обозначения простоев/запасов/очередей. Число «один» обозначает количество единиц (к примеру, количество человек в очереди) |
| 5 | Обмен информацией |  | Используется для обозначения процесса оперативного сбора данных. Рекомендуется использовать данное обозначение, чтобы показать все дополнительные операции |
| 6 | Передача из рук в руки |  | Используется для обозначения передачи документа на бумажном носителе из рук в руки |
| 7 | Передача через электронную систему |  | Используется для обозначения передачи документа/информации в специальной электронной системе/программе, по электронной почте |
| 8 | Передача по телефону |  | Используется для обозначения передачи информации по телефону |
| 9 | Дополнительная информация |  | Используется для обозначения любой текстовой дополнительной информации, имеющей существенное значение для анализа и проведения дальнейших улучшений |
| 10 | Потери/ несоответствия, проблемы |  | Используется для обозначения выявленных проблем/нарушений/потерь в потоках и процессах. Цвет – красный. Цифрой обозначается порядковый номер проблемы |

*Рис. 7*. Символы для построения карты потока создания ценности

Последовательное построение карты текущего и целевого состояния потока создания ценностей позволяет провести поэтапную диагностику проблем и потерь, определить области для улучшений и сформировать конкретные действия по оптимизации процессов медицинской организации. Применение данной методики способствует переходу к эффективному, пациент-ориентированному управлению, минимизации неэффективных этапов и повышению качества предоставления медицинских услуг.

Визуализация процессов с использованием рекомендованных символов облегчает восприятие и анализ существующих операций, а также формирование стратегии дальнейших улучшений.

В результате проведённой работы формулируется набор мероприятий и решений, направленных на устранение выявленных недостатков и организацию работы согласно принципам бережливого производства.

## Библиографический список

1. Федеральный проект «бережливая поликлиника» применение методов бережливого производства в медицинских организациях открытие проектов по улучшениям. Методические рекомендации. Москва, 2017 г.

2. Федеральный проект «бережливая поликлиника» применение методов бережливого производства в медицинских организациях. Поток создания

ценности картирование начальный уровень. Методические рекомендации. Москва, 2017 г.

3. В.А.Бойков,С.В.Барановская, И.А. Деев и [др.]. Технологии бережливого производства в совершенствовании амбулаторной медицинской помощи: учебное пособие. Томск: Изд-во СибГМУ,2021 – 94 с.

© Иванова У.В., 2026

УДК 615.471

Р.М. ИШМУРАТОВА
*ralinaishwork@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Л.Р. САЯПОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО АППАРАТА ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОТКАНЬ

***Аннотация.*** В статье представлены результаты проектирования полупроводникового лазерного аппарата для хирургического воздействия на биоткань на примере удаления кожных новообразований. Разработана структурная и принципиальная схемы устройства.

***Ключевые слова:*** лазерный аппарат, полупроводниковый лазер, стабилизатор тока, микроконтроллер STM32, система охлаждения, медицинская аппаратура.

Лазеры находят широкое применение в медицине благодаря возможности бескровного, малотравматичного и высокоточного воздействия. По сравнению с традиционными методами (электрокоагуляция, криодеструкция, хирургическое иссечение) лазерный метод обеспечивает меньшую зону термического повреждения и сокращает период реабилитации.

В работе спроектирован аппарат на базе полупроводникового лазерного диода SPL TL90AT03. Управление оптической мощностью осуществляется стабилизацией прямого тока лазера с помощью микроконтроллера STM32.

Структурная схема, представленная на рисунке 1, включает: блок питания, микроконтроллерный блок управления, оптический блок с волоконно-оптическим инструментом.

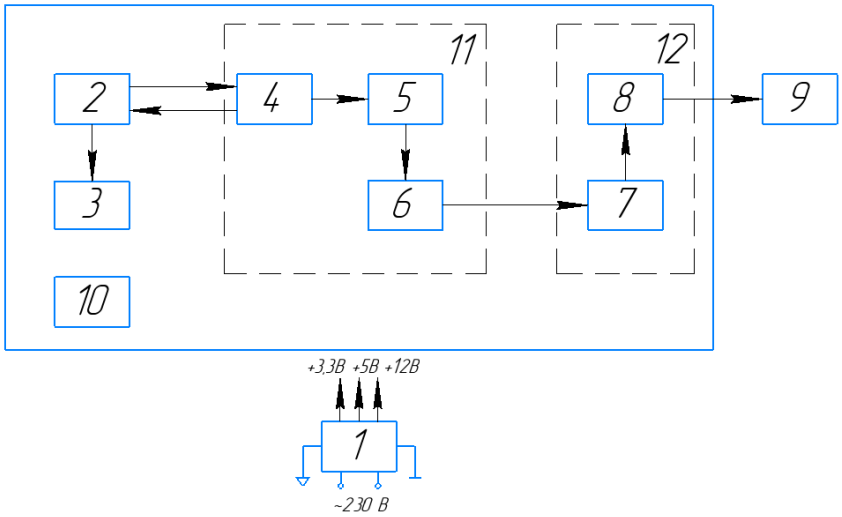



*Рис.8.* Структурная схема

На принципиальной схеме, изображенной на рисунке 2, ключевым узлом является управляемый генератор тока на операционном усилителе LM258 и транзисторном каскаде (VT2, VT3). Обратная связь формируется резистивным шунтом R8–R9.

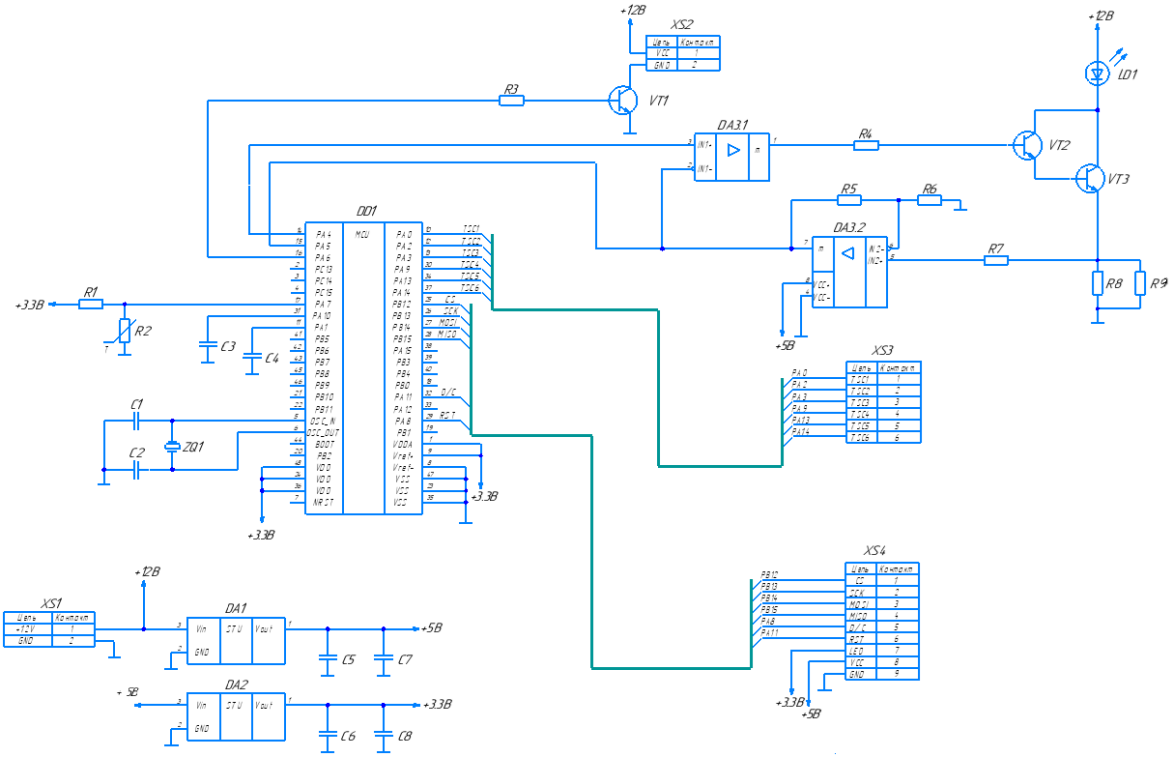



Рис. 9. Принципиальная схема

В качестве источника излучения применяется полупроводниковый лазерный диод LD1 типа SPL TL90AT03. Выходная оптическая мощность данного прибора линейно зависит от величины прямого тока, что обуславливает необходимость его точной стабилизации для управления мощностью лазерного луча. С этой целью разработана схема регулируемого

источника тока, включающая два операционных усилителя DA3.1, DA3.2 и транзисторный каскад на элементах VT2 и VT3.

Формирование требуемого уровня оптической мощности осуществляется посредством цифро-аналогового преобразователя, встроенного в микроконтроллер STM32F302. Напряжение с выхода ЦАП поступает на вход генератора тока, причём его номинал выбирается с учётом особенностей топологии и питающего напряжения управляющего ядра. В схеме присутствуют конденсаторы выборки C3 и C4 (200 пФ), ёмкость которых соответствует значению ёмкости тела человека.

Усилитель DA3.1, реализованный на микросхеме LM258, совместно с составным транзисторным ключом Дарлингтона VT2–VT3 и петлёй отрицательной обратной связи обеспечивает формирование заданного тока на коллекторе выходного транзистора VT3, функционирующего в линейной области. Резистор R4 служит для ограничения базового тока транзистора VT2, предотвращая перенапряжение на обоих полупроводниковых приборах. Коэффициент преобразования задаётся резисторами R5 (27 кОм) и R6 (3,6 кОм). Вход операционного усилителя DA3.2 защищён резистором R7 аналогичного номинала 3,6 кОм.

Роль датчика тока в цепи обратной связи выполняют резисторные шунты R8 и R9. Сигнал падения напряжения на шунте предварительно усиливается неинвертирующим каскадом DA3.1.

С целью исключения перегрева радиатора и выхода лазерного диода из строя предусмотрена система принудительного воздушного охлаждения. Вентилятор подключается через разъём XS2. Температурным датчиком служит терморезистор R2, закреплённый непосредственно на радиаторе. При нагреве лазерного диода сопротивление терморезистора изменяется, что является сигналом для микроконтроллера на включение вентилятора.

Через разъём XS3 подключаются кнопки управления и ЖК-дисплей DEM 128128C FGH-PW. Взаимодействие между микроконтроллером и экраном организовано по интерфейсу SPI.

Электропитание всей схемы осуществляется через разъём XS1 от AC-DC преобразователя, параметры которого рассчитаны исходя из суммарного напряжения и мощности потребляемых цепей. В качестве источника питания используется блок RPS-75-12, обеспечивающий питание цепей управления, процессора и опорного напряжения. Формирование необходимых уровней напряжения возложено на линейные стабилизаторы серии AMS1117 (DA1, DA2). Фильтрацию помех выполняют электролитические конденсаторы C5, C6 (225 мкФ) для низкочастотных составляющих и керамические C7, C8 (200 пФ) для высокочастотных.

**Заключение**

Спроектирован функциональный макет лазерного аппарата для воздействия на биоткань. Устройство реализует стабилизацию тока лазера с погрешностью 2,6%, оснащено активным охлаждением и микроконтроллерным

управлением. По сравнению с серийными аналогами («Лазермед-10», «Латус-К», «Медиола Компакт») предложенное решение отличается модульностью, низкой стоимостью компонентной базы и возможностью гибкой настройки режимов работы.

## Библиографический список


1. Лазеры, виды, свойства и применение [Электронный ресурс] / URL: https://m-focus.ru/lazery-vidy-svoystva-i-primenenie/ (Дата обращения 20.04.2026)
2. Регистрационное удостоверение № РЗН 2014/2111 от 31.05.2023 на медицинское изделие «Аппарат лазерный медицинский полупроводниковый «Лазермед-10»»
3. Лазерный хирургический аппарат Лазермед-10 [Электронный ресурс] / URL: https:// vendem.ru/catalog/khirurgiya/khirurgicheskie_lazery/lazermed_10/#desc (Дата обращения 29.10.2025)
4. Багдасарьян, Х.С. Медицинские лазеры: устройство и применение: учебное пособие. – М.: Медицинская книга, 2018. – 304 с.
5. Латус-К Лазерный медицинский аппарат, Аткус [Электронный ресурс] / URL: https://ivlabmed.ru/products/lazernyy-meditsinskiy-apparat-latus-k-atkus/ (Дата обращения 30.10.2025)
6. «Медлазерсистемы»: Медицинские лазерные аппараты. [Электронный ресурс] / URL: https://med-lazer.ru/catalog/mediola-compact (Дата обращения 1.11.2025)
7. Регистрационное удостоверение № ФСР 2011/10169 от 24.02.2011 на медицинское изделие «Аппарат лазерный медицинский ЛАТУС-К»
8. Регистрационное удостоверение № ФСЗ 2011/0996 от 10.06.2014 на медицинское изделие «Аппарат лазерный медицинский «МЕДИОЛА-КОМПАКТ»»


© Ишмуратова Р.М., 2026

УДК 004.6

И.К. КОЧЕТОВА
*ikkochetova@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Е.С. МОРОЗОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЯ СТРЕССА У МЕДИЦИНСКИХ РАБОТНИКОВ

*Аннотация*. В статье рассмотрена проблема профессионального стресса медицинских работников, как один из ключевых вызовов для современного здравоохранения в условиях кадрового дефицита, высокой интенсивности труда и роста психоэмоциональной нагрузки. На основе анализа существующих цифровых решений предложена структура информационно-аналитической системы, предназначенной для комплексного исследования уровня стресса.

*Ключевые слова*: профессиональный стресс, медицинские работники, информационно-аналитическая система, выгорание, цифровой мониторинг, здравоохранение, MBI, JDC-S, психоэмоциональное состояние.

Профессиональная деятельность медицинских работников относится к числу наиболее напряжённых видов труда, поскольку осуществляется в условиях высокой ответственности, ограниченного времени и необходимости принятия решений в ситуациях неопределённости. Для врачей, среднего медицинского персонала, сотрудников стационаров, реанимационных и операционных отделений стрессовые воздействия нередко приобретают хронический характер, что создаёт предпосылки для эмоционального истощения и влечет снижение профессиональной эффективности.

Актуальность исследования данной проблемы определяется не только локальными особенностями организации труда в системе здравоохранения, но и мировой ситуацией. По данным Всемирной организации здравоохранения, к 2030 г. глобальный дефицит работников здравоохранения может составить около 10 млн человек [1]. Это может привести к дальнейшему усилению нагрузки на действующий персонал, росту количества смен, переработок и повышение риска профессионального стресса. В связи с этим возникает необходимость в создании специализированной информационно-аналитической системы, которая позволила бы осуществлять исследование уровня стресса, анализировать его причины и формировать основу для своевременных профилактических мер.

Цель исследования — предложить структуру информационно-аналитической системы исследования уровня стресса у медицинских работников на основе анализа существующих цифровых решений.

**Материалы и методы**

Анализируя современные цифровые решения в области оценки психоэмоционального состояния работников, их можно разделить на три основные группы.

К первой группе относятся инструменты регулярной самооценки эмоций. Примером является Mood Meter, разработанный Yale Center for Emotional Intelligence [7]. Данное решение позволяет пользователю фиксировать эмоциональное состояние по двум измерениям: энергетической активации и эмоциональной валентности. Его преимуществами являются простота применения, высокая частота сбора данных и развитие навыков эмоциональной рефлексии, однако инструмент ориентирован преимущественно на индивидуальное самонаблюдение и не учитывает специфику профессиональной нагрузки медицинского работника, что ограничивает его использование в организационной аналитике.

Вторую группу составляют скрининговые решения, предназначенные для быстрого выявления неблагополучия. Наиболее показательным примером является Well-Being Index клиники Mayo [5; 6]. Его достоинством является научная валидность и возможность быстрого выявления групп риска среди работников здравоохранения. Подобные решения преимущественно решают задачу первичного скрининга и не обеспечивают глубокого анализа причин стресса в связи с длительностью смен, числом дежурств, кадровым дефицитом и другими организационными факторами.

К третьей группе относятся платформы цифровой профилактики и поддержки благополучия сотрудников, такие как Headspace for Work [8]. Они предлагают медитации, техники восстановления, рекомендации по улучшению сна и снижению тревожности. Подобные системы полезны как инструменты сопровождения и профилактики, однако не являются полноценными аналитическими средствами исследования профессионального стресса в медицинской организации.

Отечественные разработки в данной области в основном сосредоточены на HR-опросах, психологической поддержке и корпоративных программах благополучия. Их преимущества заключаются в локальной адаптации, русскоязычном интерфейсе и соответствии национальным условиям эксплуатации. Однако большинству из них присущи недостаточная интеграция с медицинскими и организационными данными, ограниченная глубина аналитики, а также слабая ориентированность на специфику труда медицинского персонала.

Таким образом, ни одно из рассмотренных решений в полной мере не сочетает следующие компоненты: регулярный сбор субъективных данных, применение валидизированных шкал, учёт объективной операционной нагрузки и формирование аналитической поддержки для управленческих решений. Результат анализа − предлагаемая структура информационно-аналитической системы.

**Подсистема сбора данных**

На данном уровне система должна обеспечивать получение информации из различных источников: кратких ежедневных эмоциональных чек-инов, периодических опросов уровня стресса, шкал профессионального выгорания MBI, опросника JDC-S, а также данных о фактической нагрузке — продолжительности смен, количестве ночных дежурств, переработках, числе пациентов и интенсивности рабочего процесса. Подобное объединение позволяет учитывать не только субъективное состояние сотрудника, но и объективные условия его труда.

**Подсистема хранения и предобработки данных**

Данный модуль предназначен для валидации, очистки, нормализации и обезличивания информации. Его задача заключается в формировании единого массива данных, позволяющего сопоставлять результаты психометрических измерений с организационными показателями и динамикой изменения условий труда.

**Аналитическая подсистема**

Это центральный компонент системы. Он должен обеспечивать расчёт индекса текущего стресса, индекса выгорания, оценку организационного давления по модели JDC-S, выделение групп риска и анализ динамики состояния работников. Важной функцией становится формирование интегрального индекса риска, объединяющего субъективные и объективные параметры. Такая модель позволяет выявлять не только факт неблагополучия, но и его вероятные причины.

**Подсистема визуализации и отчётности**

Результаты анализа должны представляться дифференцированно в зависимости от роли пользователя. Медицинский работник может просматривать собственный профиль состояния и получать персонализированные рекомендации; руководитель подразделения — обезличенные показатели по своему отделению; управленческий персонал медицинской организации — сводные аналитические отчёты, отражающие распределение уровня стресса и риска профессионального выгорания между различными подразделениями, сменами и профессиональными категориями.

**Подсистема рекомендаций и профилактики**

В отличие от стандартных опросных решений, информационно-аналитическая система должна не только регистрировать проблему, но и предусматривать профилактику. Для этого необходим механизм формирования индивидуальных рекомендаций по восстановлению, сигналов о необходимости обращения к специалисту, а также организационных рекомендаций по корректировке графиков, перераспределению нагрузки персонала.

**Подсистема администрирования и защиты данных**

Поскольку система работает с чувствительной информацией, принципиальное значение имеет разграничение прав доступа, журналирование действий пользователей, анонимизация и защита персональных данных. Для

медицинских организаций это не только техническое, но и этико-правовое требование.

**Вывод**

Предлагаемая система позволяет перейти от разрозненной оценки эмоционального состояния персонала к системному исследованию профессионального стресса как сложного явления, обусловленного сочетанием индивидуальных, организационных и операционных факторов. Научная значимость такого подхода состоит в возможности изучения взаимосвязи между хронической нагрузкой, эмоциональным истощением и организационной средой. Практическая значимость определяется возможностью раннего выявления неблагополучия, профилактики выгорания, снижения кадровых потерь и повышения устойчивости медицинской организации.

**Библиографический список**


1. Всемирная организация здравоохранения. Кадровые ресурсы здравоохранения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.who.int/health-topics/health-workforce (доступ свободный).
2. Водопьянова Н. Е. Синдром выгорания: диагностика и профилактика. 2-е изд. СПб.: Питер — 2009. —336 с**.**
3. Всемирная организация здравоохранения. Психическое здоровье на рабочем месте [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-health-at-work (доступ свободный).
4. Всемирная организация здравоохранения. Выгорание как профессиональный феномен: Международная классификация болезней [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.who.int/news/item/28-05-2019-burn-out-an-occupational-phenomenon-international-classification-of-diseases (доступ свободный).
5. Дёрбай Л. Н., Сателе Д., Слоан Дж., Шанафелт Т. Д. Эффективность краткого скринингового инструмента для выявления врачей в состоянии дистресса // Journal of General Internal Medicine. 2013. — Т. 28. — № 3. — С. 421–427.
6. Клиника Мэйо. Индекс благополучия (Well-Being Index) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.mywellbeingindex.org/ (дата обращения: 30.03.2026).
7. Йельский центр эмоционального интеллекта. Шкала настроения (Mood Meter) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.ycei.org/mood-meter-app (доступ свободный).
8. Headspace Health. Headspace для организаций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.headspace.com/work (доступ свободный).

9. Маслач К., Джексон С. Э., Лейтер М. П. Руководство по опроснику профессионального выгорания Маслач (Maslach Burnout Inventory Manual). 4-е изд. Menlo Park: Mind Garden — 2018. — 132 с.
© Кочетова И.К., 2026УДК 612.115.2

И.М. КУДАЯРОВ
*kudayarov-ilnur@mail.ru*
Науч. руковод. – ст. препод. кафедры БМИ Э.Ю. АБДУЛЛИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## НАУЧНЫЙ ПОДХОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОАГУЛОМЕТРА

*Аннотация*. В статье рассматриваются принципы разработки автоматического фотометрического коагулометра на базе микроконтроллера STM32F103. Представлен научный подход к проектированию структурной схемы прибора, включающего систему термостатирования, оптический измерительный тракт, аналоговый сигнальный процессор и цифровую систему управления. Обоснован выбор элементной базы, рассчитаны основные функциональные узлы.
*Ключевые слова*: коагулометр, гемостаз, свертывание крови, фотометрический метод, микроконтроллер STM32F103, оптическая плотность, автоматизация измерений, структурная схема.

Система гемостаза представляет собой сложный многокомпонентный физиологический механизм, обеспечивающий поддержание жидкого состояния крови в сосудистом русле и быстрое формирование тромба при повреждении сосудистой стенки [1]. Нарушения в работе коагуляционного звена гемостаза лежат в основе широкого спектра клинически значимых патологий: от наследственных и приобретенных коагулопатий до тромбофилий, диссеминированного внутрисосудистого свертывания и осложнений антикоагулянтной терапии [2]. В современных условиях здравоохранения точная, воспроизводимая и оперативная оценка параметров свертываемости крови является неотъемлемым компонентом лабораторной диагностики, периоперационного мониторинга, ведения пациентов в отделениях реанимации и интенсивной терапии, а также контроля дозирования препаратов. Исторически методы оценки коагуляции базировались на визуальной фиксации момента образования сгустка или на механических (реологических) принципах, однако подобные подходы обладали существенными недостатками: высокой субъективностью, зависимостью от квалификации оператора, низкой пропускной способностью и ограниченной возможностью автоматизации [3]. Научно-технический прогресс в области биомедицинской инженерии, микроэлектроники и аналитической химии привел к созданию автоматизированных коагулометрических систем, использующих оптические

(фотометрические), электрохимические и магнитометрические принципы регистрации кинетики свертывания [4]. Разработка современного автоматического коагулометра невозможна без применения строгого научного подхода, который интегрирует фундаментальные знания из области физиологии гемостаза, оптики, аналоговой и цифровой схемотехники, метрологии, теории управления и нормативного регулирования медицинской техники. Научный подход подразумевает не просто эмпирический подбор компонентов, а системный анализ клинических требований, математическое моделирование функциональных узлов, обоснованный выбор элементной базы на основе расчетных параметров, верификацию метрологических характеристик и соблюдение международных стандартов электробезопасности.

Функционирование автоматического коагулометра базируется на фотометрическом принципе регистрации кинетики биохимической реакции свертывания крови, в основе которого лежит закон Бугера–Ламберта–Бера, согласно которому интенсивность светового потока, прошедшего через оптически активную среду, экспоненциально уменьшается в зависимости от концентрации поглощающих частиц и толщины слоя [5]. В контексте коагулометрии оптически активной средой выступает плазма крови, а поглощающими частицами – образующиеся в процессе каскадной реакции агрегаты фибрина. По мере полимеризации растворимого фибриногена в нерастворимый фибриновый полимер прозрачность пробы снижается, что фиксируется как изменение оптической плотности. Аппаратная реализация данного принципа требует прецизионного контроля условий проведения реакции, поскольку ферментативные процессы системы гемостаза обладают выраженной температурной зависимостью, поэтому строгое поддержание температуры в зоне реакции (37,0 ± 0,5 °C) является обязательным условием воспроизводимости результатов [6]. В разрабатываемом устройстве термостатирование реализуется с помощью позисторного нагревательного элемента (PTC-плитки), обладающего свойством саморегулирования: при достижении заданной температуры его электрическое сопротивление резко возрастает, что естественным образом ограничивает мощность нагрева и предотвращает перегрев. Процесс автоматизированного анализа строится по следующему алгоритму: после подачи питания и инициализации системы микроконтроллер переводит устройство в режим готовности; по команде оператора активируется пробоотборочный механизм; для точного дозирования крови и реагентов используется шаговый двигатель NEMA 17, управляемый драйвером A4988; дискретный характер движения шагового двигателя (угол шага 1,8°) в сочетании с микрошаговым режимом обеспечивает высокую повторяемость объема аспирируемой жидкости, что критически важно для минимизации погрешностей на преаналитическом этапе. Заполненная кювета перемещается в термостатируемую камеру, где активируется автоматизированная мешалка для гомогенизации пробы с реагентом. Ключевым этапом является фотометрическое измерение: источник инфракрасного излучения (светодиод TSAL6100, $\lambda$ = 940 нм) формирует

стабильный световой поток, проходящий через кювету с пробой; выбор ИК-диапазона обусловлен минимальным влиянием гемоглобина и других хромофоров плазмы на результат, что повышает специфичность метода к изменению именно оптической плотности, связанной с полимеризацией фибрина. Свет, ослабленный в процессе коагуляции, попадает на кремниевый PIN-фотодиод BPW21R, генерирующий фототок, пропорциональный интенсивности прошедшего излучения. Поскольку фототок имеет крайне малую величину (микроамперный и субмикроамперный диапазон), прямое его измерение встроенным АЦП микроконтроллера невозможно без предварительного преобразования и усиления.

Разработанная структурная схема представлена на рисунке 1.

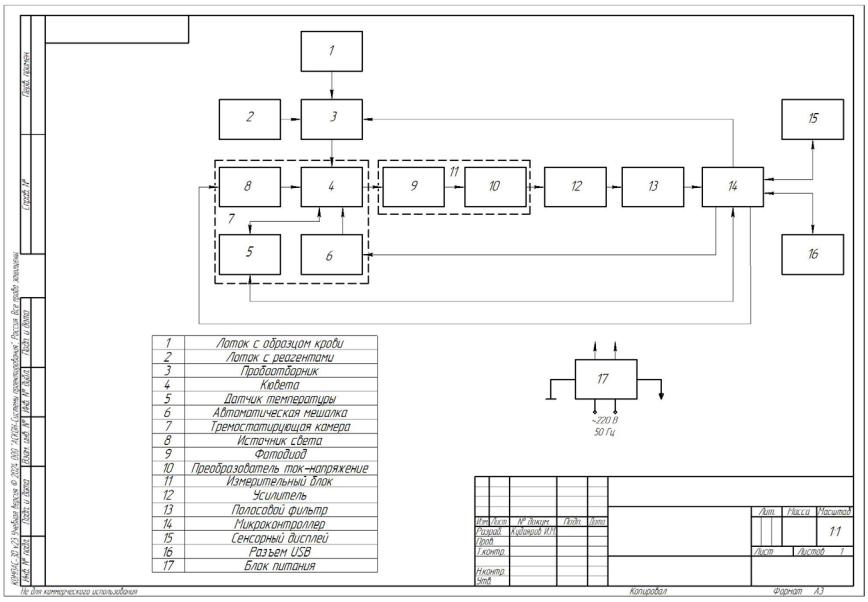



*Рис.1.* Структурная схема «Коагулометр»

Структурная схема автоматического коагулометра отражает системный подход к проектированию, при котором сложный медицинский прибор разбивается на функционально законченные модули, каждый из которых выполняет строго определенную задачу, взаимодействуя с остальными блоками по стандартизированным интерфейсам. Архитектура устройства включает: термостатируемую измерительную камеру, оптико-электронный тракт, аналоговый сигнальный процессор, цифровой управляющий комплекс, силовую исполнительную подсистему, многоуровневый блок питания и интерфейс взаимодействия с пользователем. Научная обоснованность такой архитектуры заключается в соблюдении принципов модульности, гальванической развязки, помехозащищенности и метрологической верифицируемости. Медицинские приборы, контактирующие с биологическими жидкостями и работающие в непосредственной близости от пациентов, должны соответствовать строгим требованиям стандарта IEC 60601-1 по электробезопасности, поэтому в разрабатываемом коагулометре реализована многоуровневая система преобразования напряжения с

гальванической развязкой. Сетевое напряжение ~230 В поступает на импульсный AC-DC преобразователь RSP-150-12, формирующий стабилизированные +12 В для питания силовых цепей; далее изолированный DC-DC преобразователь B1205S-2WR2 формирует +5 В, обеспечивая гальваническую развязку между сетевой и низковольтной частями; напряжение +5 В, в свою очередь, подается на преобразователь B0503S-1WR3, генерирующий +3,3 В для питания цифровой логики. Каждый каскад снабжен блокировочными и сглаживающими конденсаторами (керамическими и электролитическими), LC-фильтрами на входе АЦП, что минимизирует пульсации и высокочастотные помехи, критичные для точных аналоговых измерений. Разделение аналоговой и цифровой земель, применение отдельных цепей питания для измерительного тракта и микроконтроллера, а также использование изолированных преобразователей гарантирует отсутствие опасных токов утечки и соответствует классу защиты BF (Body Floating). Научный подход при проектировании аналоговой части основывается на расчете соотношения сигнал/шум, подборе компонентов с минимальными дрейфовыми характеристиками и математическом моделировании частотных свойств фильтров. Операционные усилители MCP6001 и OPA4340 выбраны благодаря низкому напряжению смещения (±3 мВ и ±0,5 мВ соответственно), минимальному входному току смещения (пикоамперный диапазон) и наличию Rail-to-Rail выходов, что позволяет эффективно работать при однополярном питании и использовать полный динамический диапазон АЦП. Расчет преобразователя ток–напряжение, усилительных каскадов и фильтра Саллена–Ки выполнен на основе классических формул теории цепей. Коэффициенты усиления, частоты среза, номиналы резисторов и конденсаторов подобраны из стандартных рядов E96 с последующей проверкой на соответствие требуемым амплитудно-частотным характеристикам [7]. Сигнал с фотодиода поступает на инвертирующий вход операционного усилителя MCP6001, включенного по схеме преобразователя ток–напряжение (TIA). Коэффициент преобразования определяется номиналом резистора в цепи обратной связи (R = 2,2 МОм), что позволяет получить выходное напряжение, пригодное для дальнейшей обработки. Для подавления высокочастотных шумов и ограничения полосы пропускания параллельно резистору обратной связи установлен конденсатор емкостью 47 пФ. Далее сигнал проходит через неинвертирующий усилитель (коэффициент усиления K ≈ 11) и активный фильтр нижних частот второго порядка, выполненный по топологии Саллена–Ки на прецизионном ОУ OPA4340. Частота среза фильтра выбрана равной 10 Гц, что полностью покрывает спектр полезных изменений оптической плотности (кинетика свертывания протекает в течение десятков секунд–минут) и эффективно подавляет сетевые наводки 50 Гц, цифровые помехи от микроконтроллера и собственные шумы усилительных каскадов. Ядром цифровой системы является микроконтроллер STM32F103C8T6 на базе ARM Cortex-M3, работающий на тактовой частоте до 72 МГц. Выбор данной архитектуры обусловлен оптимальным балансом вычислительной мощности, объема Flash/SRAM

памяти, развитой периферии и энергопотребления. Микроконтроллер реализует аппаратные интерфейсы SPI для высокоскоростной передачи данных на дисплей ILI9341, полноскоростной USB 2.0 для связи с внешними системами, аппаратные таймеры для генерации точных STEP/DIR импульсов шагового двигателя, каналы ШИМ для плавного управления нагревателем и двигателем постоянного тока, а также 1-Wire для чтения цифрового датчика температуры [8]. Использование аппаратных периферийных модулей вместо программного эмулирования сигналов снижает нагрузку на ядро, повышает детерминированность времени отклика и исключает джиттер, что критично для точного позиционирования пробоотборника и синхронизации измерений. Научный подход требует количественной оценки точности прибора. Погрешность разрабатываемого коагулометра формируется из мультипликативных (нестабильность коэффициентов усиления, нелинейность АЦП) и аддитивных (напряжение смещения ОУ, температурный дрейф, шумы) составляющих. Шаг квантования 12-разрядного АЦП при опорном напряжении 3,3 В составляет $\Delta \approx 0{,}8$ мВ. Погрешности смещения операционных усилителей MCP6001 и OPA4340, приведенные к входу, не превышают единиц милливольт. Суммарная расчетная погрешность измерительного тракта, полученная методом сложения независимых ошибок по квадратичному закону, составляет около 0,144%. Данный показатель соответствует требованиям к лабораторным коагулометрам (обычно $\leq$ 2–3% для клинических параметров) и подтверждает пригодность спроектированной схемотехники для диагностики системы гемостаза [9]. Таким образом, структурная схема коагулометра не является произвольным набором элементов, а представляет собой результат системного инженерного анализа, где каждый блок выбран, рассчитан и интегрирован на основе научных данных, математических моделей и нормативных требований.

Разработка автоматического коагулометра представляет собой сложный междисциплинарный процесс, в котором клинические требования к диагностике системы гемостаза трансформируются в конкретные технические решения через призму строгого научного подхода. Как показано в данной работе, проектирование прибора начинается с глубокого анализа физико-химических основ коагуляции, продолжается математическим моделированием оптического тракта, расчетом аналоговых усилительно-фильтрующих цепей, обоснованием архитектуры цифровой системы управления и завершается метрологической верификацией и технологической адаптацией под стандарты медицинской техники. Научный подход проявляется в каждом этапе создания устройства: от выбора фотометрического метода регистрации кинетики свертывания до применения прецизионных операционных усилителей с минимальным дрейфом, от внедрения многоуровневого блока питания с гальванической развязкой до расчета суммарной погрешности измерительного тракта (0,144%). Интеграция микроконтроллера STM32F103, обладающего развитой аппаратной периферией, позволила реализовать единый цикл управления – от дозирования проб и термостатирования до цифровой обработки сигнала и визуализации результатов. Клиническая значимость

спроектированного устройства заключается в обеспечении высокой точности, воспроизводимости и стандартизации коагулологических исследований; автоматизация преаналитического и аналитического этапов минимизирует влияние человеческого фактора, сокращает время выдачи результатов и позволяет безопасно интегрировать прибор в лабораторные информационные системы. Соответствие требованиям электробезопасности, использование медицинских стандартов проектирования печатных плат и применение конформных защитных покрытий гарантируют долговременную стабильность работы в условиях клинической лаборатории. Перспективы развития данной разработки связаны с внедрением алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации аномальных кривых коагуляции, расширением спектра выполняемых тестов (фибриноген, D-димер, активность факторов), миниатризацией конструкции для использования в формате point-of-care diagnostics, а также разработкой собственных калибровочных стандартов, снижающих зависимость от дорогостоящих зарубежных реагентов. Тем не менее, уже на текущем этапе спроектированный автоматический фотометрический коагулометр демонстрирует, что научный подход, основанный на системном анализе, расчетном обосновании и соблюдении нормативных требований, является единственным эффективным путем создания современной, безопасной и высокоточной медицинской аппаратуры. Реализация таких принципов в биомедицинской инженерии обеспечивает не только технологический прогресс, но и прямое повышение качества диагностики, эффективности терапии и, в конечном счете, безопасности пациентов.

**Библиографический список**

1. Баркаган З.С., Момот А.П. Диагностика и контролируемая терапия нарушений гемостаза. – М.: Ньюдиамед, 2021. – 292 с.

2. ГОСТ Р МЭК 60601-1-2010. Изделия медицинские электрические. Часть 1. Общие требования безопасности с дополняющими стандартами. – М.: Стандартинформ, 2011.

3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. – М.: Высшая школа, 2005. – 790 с.

4. Полуэктов В.А., Кузнецов А.Н. Современные коагулометры: принципы работы и клиническое применение. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2022. – 208 с.

5. Harris L.F., Castro-Lopez V., Killard A.J. Blood coagulation monitoring devices: The past, present and future of point-of-care testing // TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2013. – Vol. 50. – P. 85–96.

6. Петрищев Н.Н., Папаян Л.П. Гемостаз. Физиологические механизмы, принципы диагностики основных форм геморрагических заболеваний. – СПб.: Изд-во СПбГМУ, 1999. – 184 с.

7. Федоровский Н.Н. Фотометрические методы анализа. – М.: ФЛИНТА, 2024. – 72 с.

8. Методические указания МУК 4.2.2021-06. Метрологическое обеспечение лабораторных коагулометров. – М.: ФЦС, 2006.
9. Савельев В.С., Балябин А.А. Автоматизация клинико-лабораторных исследований системы гемостаза. – СПб.: СпецЛит, 2020. – 224 с.

© Кудаяров И.М., 2026

УДК 618.7

Р.А. КУДРЯШОВА
*kudryashovareginochka@yandex.ru*
Науч. руководов. – б. ст. ассистент каф. БМИ, К.Р. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ФЕТАЛЬНЫЙ ДОППЛЕР В ТЕЛЕМЕДИЦИНЕ: ВНЕДРЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРЕНАТАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

*Аннотация.* Рассмотрено применение фетального допплера в системе телемедицина с использованием технологий искусственный интеллект для пренатального мониторинга. Показаны возможности повышения точности диагностики, автоматизации анализа данных и организации дистанционного наблюдения за состоянием плода. Отмечены преимущества и ограничения внедрения интеллектуальных технологий в акушерскую практику.

*Ключевые слова:* фетальный допплер, телемедицина, искусственный интеллект, пренатальный мониторинг, ультразвук.

### Введение

Современное здравоохранение развивается в условиях стремительной цифровизации, где важную роль играет телемедицина как инструмент повышения доступности и качества медицинской помощи. Особенно актуально это направление в акушерстве, где регулярный контроль состояния плода является необходимым условием благополучного течения беременности. Одним из ключевых показателей, отражающих состояние плода, является частота его сердечных сокращений, которая позволяет судить о функциональном состоянии сердечно-сосудистой системы и своевременно выявлять возможные отклонения.

Фетальный допплер представляет собой портативное медицинское устройство, основанное на использовании ультразвуковых волн и эффект Доплера, позволяющее регистрировать сердцебиение плода в неинвазивной форме. В последние годы наблюдается активное внедрение данных устройств в систему удалённого медицинского наблюдения, что позволяет использовать их

не только в условиях медицинских учреждений, но и в домашних условиях под контролем специалистов.

Параллельно с этим интенсивно развивается искусственный интеллект, который находит всё более широкое применение в диагностике и мониторинге различных состояний. Использование алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей открывает новые возможности для обработки медицинских данных, повышая точность интерпретации результатов и снижая влияние человеческого фактора. В связи с этим особый интерес представляет интеграция фетального допплера, телемедицины и технологий искусственного интеллекта в единую систему пренатального мониторинга.

Целью данной работы является анализ возможностей применения фетального допплера в телемедицинских системах, а также оценка перспектив внедрения алгоритмов искусственного интеллекта для повышения эффективности наблюдения за состоянием плода.

**Основная часть**

Фетальный допплер широко используется для регистрации сердечной активности плода благодаря своей простоте и доступности. Однако обработка и интерпретация получаемых сигналов остаётся сложной задачей из-за наличия шумов, артефактов и физиологических особенностей. Современные исследования показывают, что традиционные методы анализа ограничены в точности, особенно при домашнем использовании устройств, что обусловливает необходимость внедрения более интеллектуальных подходов.

Развитие телемедицинских технологий позволило существенно расширить возможности применения фетальных допплеров. Передача данных через мобильные приложения и облачные платформы делает возможным дистанционное наблюдение за состоянием плода. Это особенно важно для женщин с осложнённой беременностью, а также для пациентов, проживающих в удалённых регионах. В пилотном исследовании Nir et al. (2023) было показано, что использование телемедицинских решений для дистанционного мониторинга беременности сопровождается высоким уровнем удовлетворённости пациенток и позволяет эффективно дополнять традиционные визиты к врачу. [6]

Особый интерес представляет применение телемедицины при ведении беременностей высокого риска. В исследовании Le Vance et al. (2025) установлено, что более 75% записей дистанционного мониторинга сердечной деятельности плода содержали достаточное количество данных для клинической интерпретации, что подтверждает надёжность данного подхода. Это свидетельствует о том, что телемедицина может обеспечить качественный контроль состояния плода даже вне медицинских учреждений. [7]

Дополнительные данные подтверждают эффективность удалённого мониторинга в долгосрочной перспективе. В рамках анализа многолетнего опыта телемедицинских систем было показано, что внедрение дистанционного

контроля способствует улучшению доступа к специализированной помощи и снижению затрат на медицинское обслуживание.

Несмотря на преимущества, одной из ключевых проблем остаётся точность интерпретации сигналов фетального допплера. Пользователи без медицинской подготовки могут допускать ошибки, принимая пульс матери за сердцебиение плода или неправильно оценивая полученные данные. В этой связи особую роль играет внедрение искусственного интеллекта, который способен автоматизировать анализ сигналов. [1]

Алгоритмы машинного обучения позволяют эффективно выделять сердечные сигналы плода, фильтровать шумы и повышать точность расчёта частоты сердечных сокращений. В ряде исследований показано, что использование нейронных сетей значительно улучшает качество обработки биомедицинских сигналов по сравнению с традиционными методами. Кроме того, такие алгоритмы способны анализировать вариабельность сердечного ритма и выявлять ранние признаки патологических состояний.

Дополнительные перспективы связаны с использованием так называемых edge-AI решений, которые позволяют обрабатывать данные непосредственно на устройстве без необходимости передачи в облако. [5] Это обеспечивает более быструю обработку информации и снижает зависимость от интернет-соединения. В исследованиях показано, что такие системы способны в реальном времени оценивать качество сигнала и выявлять отклонения, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов.

Несмотря на значительный потенциал, внедрение искусственного интеллекта в телемедицинские системы требует решения ряда задач. К ним относятся обеспечение высокой точности алгоритмов, защита персональных медицинских данных и необходимость клинической валидации технологий. Кроме того, важно учитывать, что такие системы должны использоваться как вспомогательный инструмент и не могут полностью заменить врача.

В перспективе развитие фетальных допплеров будет связано с дальнейшей интеграцией с мобильными устройствами, созданием носимых систем и совершенствованием алгоритмов искусственного интеллекта. Ожидается, что такие решения позволят обеспечить непрерывный мониторинг состояния плода и своевременное выявление патологий, что существенно повысит качество пренатальной помощи.

**Исследование PROMETHEUS (2024)**

Например, в рамках исследования PROMETHEUS (2024) было установлено, что использование ИИ при анализе данных ультразвукового скрининга повышает чувствительность выявления патологий до 88,9% по сравнению с 81,5% при стандартном подходе. [4]

Исследование было организовано как рандомизированное, открытое клиническое испытание, проведённое в крупном университетском медицинском центре.

В исследование включили 78 беременных женщин, среди которых были как пациентки с нормально протекающей беременностью, так и случаи с выявленной патологией, в частности врождёнными пороками сердца плода (26 случаев).

Также в исследовании участвовали 58 специалистов по ультразвуковой диагностике (сонографов), привлечённых из различных медицинских учреждений.

Ключевая особенность исследования – сравнение двух подходов:

1. стандартного ультразвукового скрининга;
2. скрининга с использованием системы искусственного интеллекта.

Каждая беременная участница проходила два исследования: одно с применением ИИ, другое – без него. Это позволило напрямую сравнить результаты в одинаковых клинических условиях.

Сонографы были рандомизированы (случайным образом распределены) на выполнение исследований либо с использованием ИИ, либо по стандартной методике. При этом они были ослеплены относительно диагноза плода (не знали заранее, есть ли патология), что снижало риск предвзятости.

В AI-ассистированной группе использовалась система, которая в реальном времени:

1. автоматически определяла 13 стандартных анатомических срезов (плоскостей);
2. сохраняла необходимые изображения;
3. выполняла 4 ключевых биометрических измерения плода.

При этом важно, что ИИ не ставил диагноз самостоятельно, а выступал как инструмент поддержки врача, автоматизируя рутинные этапы исследования.

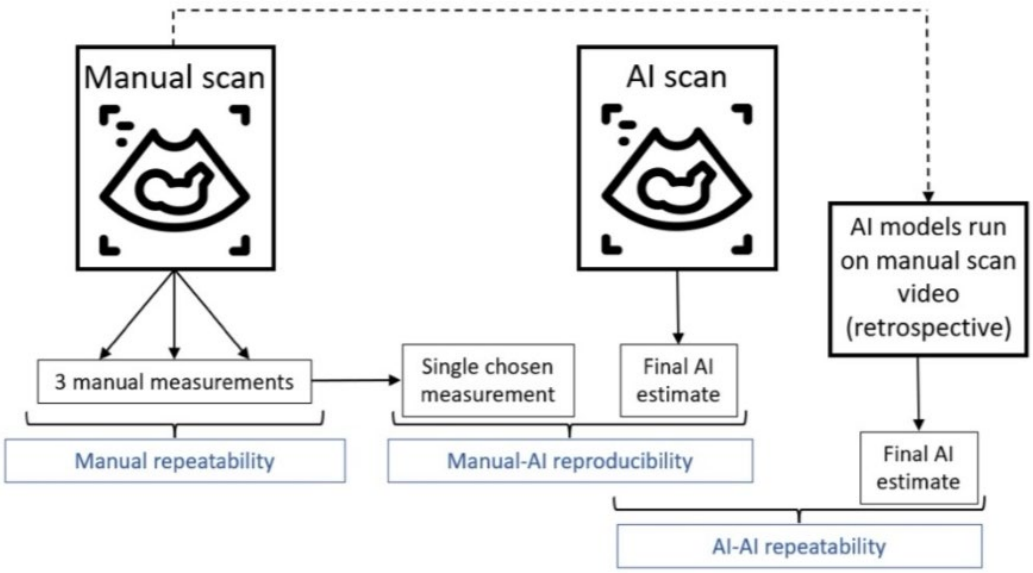



*Рис.1.* Схематическое изображение сравнения биометрических измерений

**Заключение**

Интеграция фетального допплера в систему телемедицина в сочетании с технологиями искусственный интеллект является перспективным направлением развития пренатального мониторинга. Использование телемедицинских решений позволяет обеспечить непрерывное и доступное наблюдение за состоянием плода, особенно в условиях ограниченного доступа к медицинским учреждениям или при ведении беременностей высокого риска.

Внедрение алгоритмов искусственного интеллекта существенно повышает точность интерпретации допплеровских сигналов, снижает влияние человеческого фактора и позволяет автоматизировать обработку данных. Результаты современных исследований подтверждают, что применение ИИ способствует увеличению чувствительности диагностики и сокращению времени проведения обследований, что в целом повышает эффективность медицинской помощи.

В то же время данные технологии не лишены ограничений, включая необходимость клинической валидации алгоритмов, обеспечение безопасности персональных данных и сохранение ключевой роли врача в процессе принятия решений. Фетальный допплер с элементами искусственного интеллекта следует рассматривать как вспомогательный инструмент, дополняющий, но не заменяющий традиционные методы диагностики.

**Библиографический список**

1. Захаров И. С. и др. ТЕЛЕМЕДИЦИНА В АКУШЕРСТВЕ И ГИНЕКОЛОГИИ //Кремлевская медицина. Клинический вестник. – 2025. – №. 2. – С. 115-121.

2. Иванов, А. В. Совершенствование методов интранатального мониторинга плода / А. В. Иванов, С. К. Петрова // Журнал акушерства и женских болезней. — 2020. — Т. 69, № 3. — С. 45–52.
3. Леванов В. М., Перевезенцев Е. А., Калиткина О. А. Применение телемедицинских технологий при оказании медицинской помощи в акушерстве и гинекологии (ОБЗОР) //Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. – 2021. – Т. 7. – №. 2. – С. 23-30.
4. Day T. G. et al. EP01. 08: Artificial intelligence to assist in the screening fetal anomaly ultrasound scan (PROMETHEUS): a randomised controlled trial //Ultrasound in Obstetrics & Gynecology. – 2024. – Т. 64.
5. Заммоев А. У., Абуталипов Р. Н. Биоинженерные нейрокомпьютерные интерфейсы: вводный обзор технологий, клинических применений и этико-правовых вызовов //Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2025. – Т. 27. – №. 5. – С. 125-142.
6. Nir O. et al. Integrating technologies to provide comprehensive remote fetal surveillance: A prospective pilot study //International Journal of Gynecology & Obstetrics. – 2024. – Т. 164. – №. 2. – С. 662-667.
7. Le Vance J. et al. Remote maternal-fetal telemedicine monitoring for high-risk pregnancy care: A feasibility study //PLoS One. – 2025. – Т. 20. – №. 11.
© Кудряшова Р.А., 2026

УДК 616.151.5-074

И.С. КУЛЕШОВ
*gogaKuleshov@yandex.ru*
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент Е.С. МОРОЗОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОАГУЛОМЕТРОВ (ОБЗОР)

*Аннотация.* В статье рассматриваются основные принципы работы коагулометров — приборов для исследования свертываемости крови. Описаны наиболее распространенные методы регистрации процесса свертывания: оптический, механический и пьезоэлектрический. Обозначены перспективные направления развития биотехнических систем данного типа, включая автоматизацию, миниатюризацию и применение интеллектуальных алгоритмов обработки сигналов.
*Ключевые слова:* коагулометр, свертываемость крови, гемостаз, методы регистрации, биотехнические системы.

Свертываемость крови — один из важнейших показателей здоровья человека. Нарушения в этой системе могут приводить к серьезным последствиям: от тромбозов (образования сгустков внутри сосудов) до

кровотечений. Поэтому контроль состояния системы гемостаза (процесса свертывания) является важной задачей клинической диагностики. Как отмечают В.В. Долгов и П.В. Свирин, нарушения гемостаза занимают одно из ведущих мест в структуре причин послеоперационных осложнений и летальности.

Для оценки свертываемости крови используются специальные приборы, такие как коагулометры. С технической точки зрения коагулометр представляет собой биотехническую систему, то есть комплекс, объединяющий биологический объект (образец крови) и техническое устройство (прибор с датчиками и микропроцессором). Задача такого комплекса — зафиксировать момент образования сгустка и определить время, за которое это произошло.

Актуальность разработки и совершенствования коагулометров, согласно анализу, проведенному Л.П. Цывкиной и А.В. Караваевым, обусловлена растущей потребностью в быстрой и точной диагностике нарушений свертывания, особенно в условиях кардиологии, хирургии, акушерства и при лечении пациентов, принимающих антикоагулянты (препараты, разжижающие кровь). В данной работе рассмотрены основные подходы к регистрации процесса свертывания и обозначены пути развития таких приборов.

Чтобы понять, как работает коагулометр, нужно представить, что происходит с кровью в момент свертывания. Жидкая кровь постепенно превращается в гель — образуется фибриновый сгусток. Как указывает Д.М. Зубаиров, процесс свертывания представляет собой каскад ферментативных реакций, конечным этапом которого является переход растворимого фибриногена в нерастворимый фибрин. Этот процесс сопровождается изменением физических свойств среды: меняются прозрачность, вязкость, масса и плотность. Жидкая кровь прозрачна или полупрозрачна, легко течет, а образовавшийся сгусток рассеивает свет, он обладает упругостью и сопротивляется движению, также в процессе образования сгустка на поверхности могут оседать клетки крови и белковые структуры.

Именно эти изменения и фиксируют коагулометры. В зависимости от того, какое физическое свойство регистрируется, различают несколько методов.

Основные методы регистрации

1. Оптический метод. Это самый распространенный метод. По данным А.М. Копылова и Н.А. Ивановой, оптический метод используется более чем в 70% автоматических коагулометров, выпускаемых в мире. В кювету с кровью направляют луч света. С другой стороны, находится фотоприемник, который измеряет интенсивность прошедшего или рассеянного света.

В начале реакции кровь прозрачна, света проходит много. По мере образования сгустка среда становится мутной, света проходит меньше. Когда сгусток полностью сформирован, кривая изменения интенсивности света меняет наклон. Момент, в который происходит это изменение, фиксируется как точка свертывания.

Преимущества: высокая чувствительность, возможность автоматизации, низкая стоимость расходных материалов.

Недостатки: результаты могут искажаться, если исходный образец крови мутный (например, из-за высокого содержания жиров) или содержит гемоглобин из разрушенных эритроцитов. Как отмечается в работе Л.П. Цывкиной и А.В. Караваева, липемия и гемолиз являются основными причинами ложных результатов при оптической коагулометрии.

2. Механический метод (метод «шарика»). В кювету с кровью помещают небольшой металлический шарик. Под действием магнитного поля шарик начинает двигаться — перекатываться или колебаться. Согласно описанию, приведенному В.В. Долговым и П.В. Свириным, механический метод позволяет исследовать образцы с любой оптической плотностью, что делает его незаменимым при работе с липидными или гемолизированными пробами.

Пока кровь жидкая, шарик движется свободно. По мере свертывания сгусток начинает препятствовать его движению. Датчики фиксируют уменьшение амплитуды колебаний, и в момент остановки шарика прибор определяет время свертывания.

Преимущества: метод не зависит от прозрачности образца, может использоваться для исследования мутных или липидных проб.

Недостатки: требуется тщательная калибровка, более сложная конструкция кювет.

3. Пьезоэлектрический метод. В этом методе используется кварцевый элемент, который колеблется с определенной частотой. Как указывают А.М. Копылов и Н.А. Иванова, пьезоэлектрический метод относится к наиболее перспективным, поскольку позволяет не только фиксировать момент свертывания, но и оценивать вязкоупругие свойства формирующегося сгустка в реальном времени.

При контакте с образцом крови изменение вязкости среды или оседание сгустка на поверхности элемента приводит к изменению частоты колебаний. Регистрируя этот сдвиг частоты, можно отслеживать динамику свертывания в реальном времени.

Преимуществами являются высокая точность, возможность непрерывного мониторинга процесса.

Недостатками являются чувствительность к внешним вибрациям, более высокая стоимость прибора.

Современные коагулометры не просто фиксируют момент, когда сигнал превысил порог. Они строят кривую изменения регистрируемого параметра во времени и анализируют ее форму. По мнению авторов обзора, в журнале «Медицинская техника», переход от порогового метода к анализу полной кинетической кривой является главным трендом в развитии коагулометрии.

Алгоритмы прибора ищут точку перегиба или момент, когда первая производная (скорость изменения) достигает максимума. Такой подход позволяет получить не только время свертывания, но и дополнительные характеристики: скорость образования сгустка, его плотность, стабильность.

Развитие биотехнических систем для коагулометрии, согласно выводам В.В. Долгова и П.В. Свирина, идет по нескольким направлениям.

— Автоматизация и многоканальность. Современные тенденции направлены на создание многоканальных приборов, способных одновременно тестировать несколько образцов или несколько параметров свертывания (протромбиновое время, активированное частичное тромбопластиновое время, концентрацию фибриногена). Это повышает производительность лабораторий и снижает влияние человеческого фактора.

— Миниатюризация. Разрабатываются портативные коагулометры для использования в палатах интенсивной терапии, в машинах скорой помощи или для самоконтроля пациентами, принимающими антикоагулянты. Как отмечают Л.П. Цывкина и А.В. Караваев, развитие портативных систем позволяет приблизить лабораторную диагностику к пациенту, что особенно важно для мониторинга терапии антикоагулянтами.

— Интеллектуальная обработка сигналов. Внедрение алгоритмов машинного обучения позволяет более точно определять момент свертывания, компенсировать искажения, связанные с индивидуальными особенностями образца, и даже прогнозировать риск осложнений по форме кинетической кривой.

— Интеграция с информационными системами. Современные коагулометры оснащаются возможностью передачи данных в лабораторные информационные системы и электронные карты пациентов, что ускоряет постановку диагноза и назначение лечения.

Коагулометры являются важным классом биотехнических систем, позволяющих объективно оценивать состояние системы гемостаза. Существующие методы регистрации — оптический, механический и пьезоэлектрический — имеют свои преимущества и ограничения, что определяет их применение в различных клинических ситуациях.

Дальнейшее развитие коагулометров, как обобщено в работе коллектива авторов, связано с повышением степени автоматизации, разработкой портативных устройств для экспресс-диагностики и внедрением интеллектуальных алгоритмов обработки сигналов. Эти направления позволят сделать контроль свертываемости крови более доступным, быстрым и точным, что в конечном итоге повысит качество медицинской помощи пациентам с нарушениями гемостаза.

## Библиографический список

1. Долгов В. В. Лабораторная диагностика нарушений гемостаза / В. В. Долгов, П. В. Свирин. – Москва : Триада, 2021. – 384 с. – ISBN 978-5-94789-456-7.

2. Зубаиров Д. М. Молекулярные основы свертывания крови и тромбообразования / Д. М. Зубаиров. – Казань : Фэн, 2020. – 367 с. – ISBN 978-5-9690-0789-3.

3. Копылов А. М. Современные методы коагулометрии: сравнительный анализ / А. М. Копылов, Н. А. Иванова // Медицинская техника. – 2024. – № 3. – С. 42–46. – ISSN 0025-8075.

4. Цывкина Л. П. Физико-химические методы исследования в клинической лабораторной диагностике / Л. П. Цывкина, А. В. Караваев. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2023. – 256 с. – ISBN 978-5-9704-7345-8.

5. Шевцов А. В. Современные тенденции в развитии лабораторной коагулометрии / А. В. Шевцов, Е. П. Морозова, И. А. Григорьева // Медицинская техника. – 2025. – № 1. – С. 42–46. – ISSN 0025-8075.

© Кулешов И.С., 2026

УДК 004.89:616.151.5

И.С. КУЛЕШОВ
*gogaKuleshov@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Е.С. МОРОЗОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОАГУЛОГРАММ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

*Аннотация.* В статье представлена архитектура интеллектуальной системы для интерпретации результатов коагулограмм, сочетающая продукционную базу знаний на основе клинических рекомендаций и модуль машинного обучения (XGBoost). Система позволяет автоматизировать поддержку принятия врачебных решений при оценке нарушений гемостаза.

*Ключевые слова:* интеллектуальная система, коагулограмма, машинное обучение, XGBoost, цифровизация здравоохранения.

В условиях цифровизации экономики особое значение приобретает трансформация медицинских услуг основываясь на интеллектуальных информационных технологиях. Лабораторная диагностика, являясь важнейшим звеном клинического принятия решений, сталкивается с проблемой обработки растущих объемов данных при этом сохраняется высокое требование к точности интерпретации получаемых результатов. Коагулограмма (гемостазиограмма) относится к числу наиболее сложных лабораторных исследований, поскольку оценка состояния системы гемостаза требует учета множества взаимосвязанных параметров: протромбинового времени (ПВ), активированного частичного тромбопластинового времени (АЧТВ), тромбинового времени (ТВ), международного нормализованного отношения (МНО), уровня фибриногена и др. Традиционная интерпретация этих данных осуществляется врачом-лаборантом или клиницистом вручную, что сопряжено

с риском субъективных ошибок и значительными временными затратами, особенно в условиях дефицита узких специалистов-гематологов.

Вопросы применения искусственного интеллекта в медицине активно разрабатываются как зарубежными, так и российскими учеными. В работах I. Goodfellow и соавт. обоснованы перспективы глубокого обучения для анализа медицинских данных. М.И. Чубирко и Е.Ю. Хрусталева демонстрируют эффективность методов машинного обучения в лабораторной диагностике. Однако существующие решения часто ориентированы на узкий круг задач и не учитывают специфику интерпретации коагулологических нарушений в контексте клинических рекомендаций.

В рамках магистерской диссертации на тему «Разработка интеллектуальной системы интерпретации результатов коагулограмм» предложена архитектура гибридной интеллектуальной системы, сочетающая продукционную базу знаний, сформированную на основе клинических рекомендаций Российской ассоциации по гемостазу и тромбозу, и модуль машинного обучения на основе градиентного бустинга (XGBoost). Архитектура системы представлена на рисунке 1.

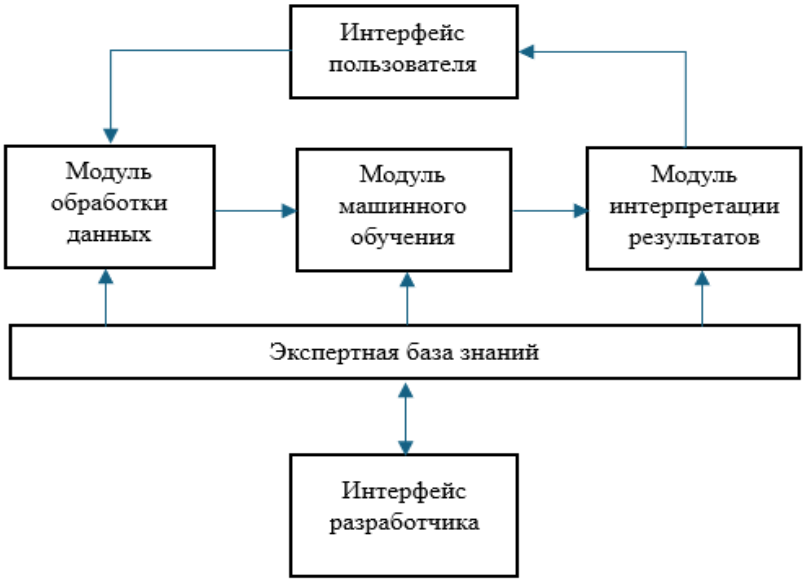



*Рис. 1.* Архитектура интеллектуальной системы интерпретации коагулограмм

Модуль обработки данных осуществляет валидацию входных данных, приведение к единому формату и фильтрацию выбросов. База знаний содержит формализованные правила, позволяющие на первом этапе выявлять типовые паттерны нарушений гемостаза (гипокоагуляция, гиперкоагуляция, ДВС-синдром). Для сложных неоднозначных случаев активируется модуль машинного обучения, обученный на анонимизированной выборке из 1250 верифицированных коагулограмм. Экспериментальное сравнение качества классификации различных алгоритмов представлено в таблице 1.

*Таблица 1*

Сравнение эффективности алгоритмов классификации нарушений гемостаза

| Алгоритм | Точность | Полнота | F1-мера |
|---|---|---|---|
| Логистическая регрессия | 82% | 80% | 81% |
| Random Forest | 89% | 87% | 88% |
| XGBoost | 94% | 93% | 93% |
| Нейронная сеть (MLP) | 91% | 90% | 90% |

Как показывают результаты, представленные в таблице 1, алгоритм градиентного бустинга (XGBoost) демонстрирует наилучшие показатели точности (94 %) и сбалансированности, что сопоставимо с уровнем эксперта-гематолога. Применение гибридного подхода позволяет повысить интерпретируемость решений за счет объяснения логики вывода через ссылки на конкретные правила или ключевые параметры, что критически важно для внедрения в клиническую практику.

Выводы. Разработанная архитектура интеллектуальной системы интерпретации коагулограмм обеспечивает автоматизированную поддержку принятия врачебных решений на основе гибридного подхода, сочетающего экспертные знания и методы машинного обучения. Система позволяет стандартизировать заключения, снизить нагрузку на врачей-лаборантов и минимизировать риск ошибок, связанных с человеческим фактором. Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию разработанного решения с медицинскими информационными системами и расширение функционала за счет модуля динамического мониторинга показателей гемостаза в серии анализов.

**Библиографический список**

1. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — Cambridge : MIT Press, 2016. — 800 p. — ISBN 978-0-262-03561-3

2. Чубирко, М. И. Применение методов машинного обучения в лабораторной диагностике / М. И. Чубирко, Е. Ю. Хрусталева // Медицинские информационные системы. — 2023. — Т. 12, № 3. — С. 45–52

3. Chen, T. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System / T. Chen, C. Guestrin // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — San Francisco, 2016. — P. 785–794. — DOI: 10.1145/2939672.2939785

4. Долгов, В. В. Клиническая интерпретация лабораторных исследований / В. В. Долгов, Н. В. Меньшикова. — М. : Лабдиаг, 2020. — 456 с. — ISBN 978-5-00045-123-4

© Кулешов И.С., 2026

УДК 57.087,004.89

С.Д. ЛЕЖАЙСКАЯ
*sofialezajskaa@gmail.com*
Науч. руковод. – ассистент каф. БМИ, Д.Ш. БАГАУТДИНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ

*Аннотация.* Исследовано применение искусственного интеллекта в биомедицине. Проанализированы методы машинного и глубинного обучения, их возможности в диагностике, персонализированной медицине, хирургии и мониторинге пациентов. Показано, что ИИ значительно повышает эффективность обработки медицинских данных и качество медпомощи.

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, биомедицина, машинное обучение, диагностика, персонализированная медицина, медицинские системы.

Искусственный интеллект (ИИ) выступает одной из магистральных технологий современной цифровой эпохи, оказывая глубокое воздействие на эволюцию многих сфер, в том числе здравоохранения. В биомедицинских системах ИИ находит применение для обработки сложноструктурированной медицинской информации, содействия выработке клинических решений, автоматизации диагностических процедур и повышения результативности лечения [1]. Стремительный прогресс вычислительных средств и накопление колоссальных массивов врачебных данных обусловили особую востребованность интеллектуальных алгоритмов.

Под биомедицинскими системами понимается совокупность аппаратных и программных инструментов, ориентированных на сбор, хранение, переработку и интерпретацию сведений о здоровье человека. К ним причисляют диагностическое оборудование, электронные медицинские карты, системы наблюдения за больными и роботизированные хирургические комплексы. Интеграция технологий искусственного интеллекта в эти системы позволяет значительно расширить их функциональный арсенал [7].

Одной из наиболее массовых сфер приложения ИИ служит медицинская диагностика. Современные алгоритмы машинного и глубинного обучения способны обрабатывать медицинские снимки – рентгенограммы, компьютерные и магнитно-резонансные томограммы. Так, свёрточные нейронные сети результативно распознают признаки новообразований, воспалительных процессов и иных патологий на начальных этапах [2]. В целом ряде случаев точность подобных систем оказывается сопоставимой с заключениями квалифицированных специалистов, что превращает их в значимый вспомогательный инструмент диагностики [5].

Не менее весомым вектором выступает анализ биомедицинских сигналов, таких как электрокардиограммы и электроэнцефалограммы. Искусственный интеллект даёт возможность в автоматическом режиме фиксировать сбои в деятельности сердца и нервной системы, что особенно ценно при наблюдении за пациентами с хронической патологией [6]. Это способствует заблаговременному обнаружению угрожающих состояний и уменьшению вероятности осложнений.

Персонализированная медицина также переживает подъём благодаря задействованию искусственного интеллекта. Данный подход подразумевает индивидуальный подбор терапии с опорой на генетические особенности больного, его образ жизни и клинический анамнез. Алгоритмы машинного обучения перерабатывают значительные массивы информации и ассистируют врачам в выборе наиболее действенных схем лечения [4]. Это приобретает особую актуальность в онкологии, где назначение таргетной терапии требует интерпретации сложных молекулярных данных.

Значимую функцию выполняют и роботизированные хирургические платформы. Иллюстрацией служит комплекс da Vinci, применяемый в малоинвазивной хирургии. Хотя подобные системы находятся под управлением врача, элементы искусственного интеллекта позволяют увеличить точность манипуляций, подавить тремор инструментов и улучшить визуализацию операционного поля [3]. В перспективе прогресс автономных хирургических систем способен привести к частичной автоматизации оперативных вмешательств.

Ещё одной значимой областью использования ИИ являются системы мониторинга состояния пациентов. Носимые устройства и сенсоры обеспечивают непрерывную регистрацию витальных показателей – пульса, артериального давления, уровня насыщения крови кислородом. Искусственный интеллект анализирует эти сведения и способен оперативно оповещать о возможных отклонениях, что крайне важно для больных с хроническими недугами и в послеоперационном периоде [6].

При всех очевидных достоинствах внедрение искусственного интеллекта в биомедицинские системы сопряжено с комплексом трудностей. К их числу относятся проблемы защиты персональных данных, высокая стоимость развёртывания технологий, потребность в крупных наборах качественных сведений для тренировки моделей, а также недостаточная прозрачность некоторых алгоритмов [6]. Кроме того, сохраняет остроту вопрос о распределении ответственности за решения, принимаемые с привлечением ИИ.

Тем не менее виды на будущее в данной области исключительно широки. Прогнозируется дальнейшая конвергенция искусственного интеллекта с технологиями больших данных, интернетом вещей и телемедициной. Это откроет путь к построению единых интеллектуальных медицинских экосистем, способных гарантировать непрерывный мониторинг здоровья и сверхточную диагностику заболеваний [7].

Таким образом, искусственный интеллект превращается в важнейший инструмент преобразования современной медицины. Его применение в биомедицинских системах даёт возможность повысить достоверность диагностики, усовершенствовать качество лечения и сделать врачебную помощь более доступной и результативной [1].

**Библиографический список**


1. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. — М.: Диалектика, 2020. — 1408 с.
2. Гудфеллоу И., Бенджио Й., Курвилль А. Глубокое обучение. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 652 с.
3. Бишоп К. М. Распознавание образов и машинное обучение. — М.: Техносфера, 2015. — 584 с.
4. Тополь Э. Глубокая медицина: как искусственный интеллект может изменить здравоохранение. — М.: Альпина Паблишер, 2020. — 400 с.
5. Ильясова Н. Ю., Липка Д. Е., Куприянов А. В. Применение искусственных нейронных сетей для оценивания диагностических параметров на биомедицинских изображениях // Институт систем обработки изображений РАН. — Самара, 2003. — С. 151–153.
6. Карпов О. Э., Храмов А. Е. Информационные технологии, вычислительные системы и искусственный интеллект в медицине. — М.: ДПК Пресс, 2022. — 480 с.
7. Министерство здравоохранения Российской Федерации. Цифровое здравоохранение в Российской Федерации: стратегия развития. — М., 2021.


© Лежайская С.Д., 2026

УДК 616.891:004.89

К.С. МАКАРОВА
*ksuta.makarova@gmail.com*
Науч. руководв. – канд. техн. наук., доцент, З.И. ХАРИСОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ДИАГНОСТИКЕ НЕВРОТИЧЕСКИХ РАССТРОЙСТВ

*Аннотация.* В статье рассматриваются современные интеллектуальные системы, применяемые в диагностике невротических расстройств. Особое внимание уделяется системам поддержки принятия врачебных решений, мобильным приложениям и цифровым ассистентам на основе искусственного интеллекта. Анализируются их возможности и преимущества в сравнении с традиционными методами диагностики.

*Ключевые слова*: невротические расстройства, врач-психотерапевт, интеллектуальные системы, анализ больших данных, мобильные приложения, чат-боты.

Невротические расстройства (неврозы) – это группа функциональных психогенных расстройств, характеризующихся разнообразием клинических проявлений, включая эмоциональные, вегетативные и соматические симптомы. Они возникают в результате воздействия стресса и не связаны с органическими поражениями нервной системы [1].

Невротические расстройства занимают одно из ведущих мест среди психических заболеваний, оказывая значительное влияние на качество жизни пациентов и функционирование систем организма. Точный диагноз ставит врач-психотерапевт, для подтверждения может потребоваться консультация терапевта и невролога, в редких случаях – других узких специалистов.

Основными причинами проявления и развития невротических расстройств являются:

1. Острые и хронические психические травмы (конфликты, утраты, профессиональные и семейные трудности);
2. Личностные особенности (повышенная тревожность, мнимость, склонность к самоанализу, низкая стрессоустойчивость);
3. Биологические факторы (наследственная предрасположенность, особенности нейрохимических процессов в головном мозге);
4. Социальные условия (неблагоприятная атмосфера в семье или на работе, нехватка социальной поддержки) [8].

Невротические расстройства могут принимать формы астенического (неврастения), истерического, двигательного и депрессивного неврозов (невротическая депрессия), невроза навязчивых состояний.

Пациенты с неврастеническими расстройствами чаще жалуются на нарушения сна, головные и мышечные боли, сердцебиение, «замирание» сердца.

Традиционные методы диагностики, основанные на:

1. Сборе анамнеза при беседе с врачом специалистом (выявление жалоб, анализ психотравмирующих ситуаций, оценка динамики симптомов);
2. Патопсихологическом обследовании (использование опросников и тестов для объективного понятия состояния);
3. Дифференциальной диагностике (исключение поражений центральной нервной системы и соматических заболеваний, которые могут имитировать невротическую симптоматику) [3].

Современные исследования уделяют особое внимание разработки и внедрению интеллектуальных систем, основанных на технологиях искусственного интеллекта (далее – ИИ) и машинного обучения (далее – МО). Применение таких систем в диагностики невротических расстройств дает возможность повышению объективности, точности и доступности медицинского сопровождения и постановки диагноза [4].

В данный момент это является актуальным, так как увеличилось число людей с тревожными и невротическими состояниями, перегруженность специалистов и высокая стоимость качественной психологической помощи тем самым подталкивая к поиску новых подходов в диагностики заболеваний. В этот момент на помощь приходят современные технологии, основанные на ИИ и МО [5].

Преимущества использования интеллектуальных систем следующие:

1. Возможность анализа больших данных (современные системы способны обрабатывать огромные объемы медицинской информации (от электронных карт пациентов и результатов анкетирования до данных нейронной визуализации и генетических тестов), благодаря этому обеспечивается выявление неочевидных закономерностей между клиническими симптомами и диагнозами, которые специалист может упустить) [2];

2. Повышение точности диагностики (интеллектуальные системы выступают в роли «второго мнения», так как анализируют данные без эмоционального фона и предвзятости по сравнению со специалистами, тем самым помогая снизить вероятность ошибок);

3. Ранее выявление (алгоритмы способны распознавать развитие незаметных невротических нарушений на ранних стадиях, до того, как они станут ярко выраженными, что позволит своевременно начать профилактические меры и начать лечение, что значительно улучшает прогноз выздоровления).

Современные интеллектуальные системы, применяемые для диагностики невротических расстройств, включают широкий спектр технологий и подходов, которые существенного повышают точность и скорость выявления нарушений [6].

Такой подход повышает не только точность и скорость выявления нарушений, но и делает возможность более доступной персональную помощь для пациентов (особенно для тех, кто по определенным причинам избегает очных визитов к специалисту).

Основными направлениями диагностики невротических расстройств в настоящее время являются:

1. Внедрение систем поддержки принятия врачебных решений (далее – СППВР), которые являются «инновацией» в области медицины и предоставляют врачам удобный интерфейс для ввода данных о состоянии пациента, включая биохимические показатели и другие важные параметры (используя большие базы данных СППВР автоматически сопоставляют введенные данные с показателями как здоровых лиц, так и тех, кто страдает различными формами нервных и психических расстройств, это позволяет выявить специфичные модели изменений, характерных именно для определенного типа заболевания, и предложить предварительный диагноз еще до появления явных клинических проявлений болезни);

2. Использование мобильных приложений также приобретает большое значение в современной диагностике. При этом данные загружаются с носимых устройств (смарт-часы, фитнес-браслеты и т.д.) непрерывно собирая данные о физиологическом состоянии пользователя, которые интеллектуальные системы

могут анализировать для выявления тревожных состояний в режиме реального времени. Приложение удобно использовать как пациенту самостоятельно, так и врачу в качестве дополнительного инструмента для уточнения диагноза и контроля эффективности назначенной терапии;

3. Внедрение чат-ботов и цифровых ассистентов на основе ИИ в сферу оказания психологической помощи. Они предоставляют возможность пациентам круглосуточную поддержку, проводя первичную диагностику, отслеживая динамику состояния пациента, предлагая полезные рекомендации по снижению тревожного состояния, путем анализа полученной информации. Такой технологический подход оказывает полезный эффект для длительного наблюдения динамики состояния пациента без посещения специалиста, тем самым позволяет своевременно определять возможные изменения в состоянии пациента и предотвратить развитие тяжелых невротических расстройств [7].

Сравнительный анализ показывает, что использование интеллектуальных систем в диагностике невротических расстройств обладает рядом преимуществ перед традиционной диагностикой:

1. Объективность диагностики (алгоритм позволяет исключить субъективные факторы (усталость, эмоции, предвзятость), характерные для оценки специалистом, т.к. анализ производится по определенным критериям, тем самым снижая вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором).

2. Ранняя диагностика (алгоритмы способны выявлять едва заметные признаки тревожных состояний, до того, как они станут ярко выраженными для специалиста при традиционной диагностике).

3. Индивидуализированный подход (интеллектуальные системы адаптируют рекомендации под конкретного пациента на основе: истории диагностики, реакции пациента предыдущие рекомендации, персональные данные пациента (пол, возраст, сопутствующие состояния), тем самым повышая эффективность терапии).

4. Постоянство мониторинга (непрерывный сбор данных позволяет отслеживать состояние пациента в реальном времени, без посещения специалиста, что позволяет заранее выявить тревожные состояния).

Таким образом, сочетание преимуществ психологической экспертизы с применением интеллектуальных систем оказывает положительное влияние при диагностике невротических расстройств.

Несмотря на преимущества применения интеллектуальных систем в диагностике невротических расстройств существуют и определенные ограничения, в частности:

1. Интеллектуальные системы выступают лишь в роли вспомогательного инструмента, т.е. они остаются инструментами поддержки, не способными полностью заменить опыт и знания специалиста;

2. Надежность и эффективность интеллектуальных систем довольно сильно зависят от качества вводимых данных и корректности алгоритмов [9], при этом, ключевыми аспектами, влияющими на их надежность и

эффективность, являются искаженные и неполные данные, выбор неподходящей архитектуры;

3. Ограничения при диагностике острых состояний (в некоторых видах заболеваний проявляются тяжелые проявления: панические атаки, тяжелые депрессивные состояния, которые требуют незамедлительного вмешательства специалиста для полного обследования и коррекции терапии).

Для минимизации рисков, необходимо:

– разработать и внедрить строгие протоколы для сбора данных;
– регулярно актуализировать модели и тестировать алгоритмы;
– обеспечивать прозрачность работы моделей для специалистов;
– интегрировать знания специалистов в процессе разработки интеллектуальных систем.

Перспективным представляется создание комбинированных моделей диагностики, объединяющих возможности интеллектуальных систем с традиционными методами для диагностики невротических состояний. Такое сочетание открывает новые возможности для улучшения качества диагностики и повышения успешности в эффективности лечебных мероприятий. Комбинированная модель диагностики имеет преимущества в диагностики:

1. За счет комплексного анализа данных повышается точность диагностики;
2. Снижаются ошибки при диагностике невротических расстройств в связи с отсутствием человеческого фактора;
3. Появляется возможность раннего выявления острых проявлений симптоматики;
4. Повышается доступность медицинской помощи населению.

Кроме того, для эффективного внедрения интеллектуальных систем в практическую психологию необходим системный анализ этических и социальных последствий применения ИИ для своевременного выявления возможных проблем.

Таким образом, современные интеллектуальные системы открывают новые возможности в диагностике невротических расстройств тем самым повышая точность, доступность и объективность медицинской помощи для населения. Это особенно актуально в условиях распространенности психологических нарушений дефицита квалифицированных специалистов.

## Библиографический список

1. Карвасарский, Б.Д. Неврозы. – 2-е издание: руководство для врачей / Б.Д. Карвасарский. – Москва: Медицина, 1990. – 576 с.

2. Антонов, В.В., Куликов, Г.Г., Кромина, Л.А. Концепция программно-аналитического комплекса образовательного процесса на основе онтологии и искусственных нейронных сетей / В. В. Антонов, Г. Г. Куликов,

Л. А. Кромина [и др.] // Онтология проектирования. 2021. Т. 11, № 3(41). С. 339-350.

3. Кекелидзе, З.И., Чехонин, В.П. Клиническая психиатрия: руководство для врачей / З.И. Кекелидзе, В.П. Чехонин. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2022 – 250 с.

4. Лебедев, М.А., Куликов, А.В. Искусственный интеллект в медицине: возможности и ограничения: учебное пособие / М.А. Лебедев, А.В. Куликов. – Москва: Москва: Медицина, 2023. – № 4. – С. 15-24 с.

5. Смирнов, А.Г., Кузнецова, Е.В. Интеллектуальные системы в ранней диагностике невротических расстройств: монография / А.Г. Смирнов, Е.В. Кузнецова. – Санкт-Петербург: Питер, 2024. – 310 с.

6. Лебедева, Н.А., Романов, И.Д. Машинное обучение в анализе психоэмоциональных состояний: учебное пособие / Н.А. Лебедева, И.Д. Романов. – Москва: Юрайт, 2025. – 276 с.

7. Фролов, И.К., Петренко, С.В. Цифровые технологии и искусственный интеллект в психодиагностике: практическое руководство / И.К. Фролов, С.В. Петренко. – Новосибирск: Наука, 2025. – 344 с.

8. Ишмеева, А. С., Харисова, З.И. Некоторые аспекты защиты пациетов медицинских учреждений при пожаре / А. С. Ишмеева, З. И. Харисова // Государство, общество, личность: история и современность : Сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Пенза, 23–24 апреля 2024 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 132-135.

© Макарова К.С., 2026

УДК 619.89-008.44-071:004.93

К.С. МАКАРОВА
*ksuta.makarova@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент, З.И. ХАРИСОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЧИ И ТЕКСТА В ДИАГНОСТИКЕ НЕВРОТИЧЕСКИХ РАССТРОЙСТВ

*Аннотация.* В статье рассматривается современные технологии обработки естественного языка и их применение для анализа речи и текста в диагностике невротических расстройств. Описываются основные этапы работы технологий, их преимущества, включая возможность раннего выявления симптомов и автоматизации анализа данных.

*Ключевые слова*: обработки естественного языка, диагностика невротических расстройств, анализ речи, анализ текста, машинное обучение, мониторинг, психиатрия, медицинская информация.

Современные методы позволяют автоматически распознавать и анализировать большие объемы текстовой информации, выявляя скрытые мысли и эмоции, характерные для различных психических заболеваний, в том числе невротических расстройств [1].

В течение последних лет технологии обработки естественного языка для анализа речи и текста становятся все более популярными и находят широкое применение в медицине, включая психиатрию и неврологию. Эти технологии приобретают особую важность в клинической практике, так как дают возможность объективно оценивать симптомы психоэмоциональных расстройств, своевременно выявлять изменения настроения, тревожные состояния и проявления агрессии.

Данные разработки открывают новые перспективы для ранней диагностики, непрерывного мониторинга состояния пациентов, а также оказывают помощь врачам в подборе лечения и постановке диагноза.

Использование технологий обработки естественного языка существенно повышает точность диагностирования невротических расстройств на начальных этапах их развития, что позволяет своевременно начать терапию и значительно увеличить шансы на быстрое выздоровление. Помимо диагностики, подобные системы применяются для постоянного отслеживания состояния пациента, фиксируя изменения показателей с течением времени. Это предоставляет специалистам дополнительную информацию для оценки результативности назначенного лечения или для его возможной корректировки в случае ухудшения состояния [3].

Невротические расстройства, также известные как неврозы, представляют собой нервно-психические состояния, при которых не наблюдается органического поражения органов. Они возникают вследствие психических травм, продолжительного стресса, а также эмоционального и физического истощения. Клиническая картина неврозов отличается большим многообразием симптомов, среди которых различные фобии, панические атаки, нарушения сна, повышенная утомляемость и вегетативные расстройства. Диагноз устанавливается после исключения других заболеваний, имеющих схожую симптоматику [2].

Многообразие симптомов невротических расстройств вынудило неврологов и психотерапевтов создать классификацию, которая учитывает механизм развития и проявления патологии:

– неврастения – истощение нервной системы при ее длительном напряжении, сопротивлении психотравмирующим факторам;

– истерический невроз, или конверсионное расстройство – эмоционально-психическая нестабильность, которая служит причиной появления соматической симптоматики;

– невроз навязчивых состояний, или обсессивно-компульсивное расстройство – патологическое состояние психики, которое заставляет человека совершать определенные действия в качестве защитного ритуала [6].

Таким образом, диагностика и лечение невротических расстройств требует учета множество факторов, отражающих разнообразные аспекты личности пациента, включая вербальные и невербальные характеристики общения, настроение, восприятие окружающей среды и внутренние переживания.

Технология обработки естественного языка представляет собой набор методов анализа текста и речи пациента, используемых для повышения точности диагностики, прогнозирования течения заболевания и улучшения качества рекомендаций специалистов. Эти методы применяются как к письменной информации (медицинские заключения, записи пациентов, публикации в социальных сетях), так и к аудиозаписям (записи бесед, интервью с пациентами).

Работу технологий обработки естественного языка можно разделить на несколько этапов:

1. Сбор речевого материала. Запись голоса пациента (интервью, рассказ, диалог).
2. Преобразование речи в текст. Автоматическое распознование речи для дальнейшего анализа.
3. Предварительная обработка текста. Этот этап включает в себя:

– токенизация (разделение текста на отдельные элементы: слова, предложения, абзацы);

– лемматизация (приведение слов к начальной форме: например, бегал - бежать);

– удаление стоп-слов (устранение часто встречающихся малозначимых слов).

4. Выявление значимых особенностей текста. После предварительной обработки текста начинает этап извлечение значимых характеристик: определение конкретных слов и выражений, грамматическое построение предложений, индивидуальные особенности стиля автора, эмоциональная окраска текста, акустические характеристики (тембр, ритм, высота голоса, паузы), тематика обсуждений [4].

Используя алгоритм машинного обучения, система распределяет полученные данные по заранее установленным категориям (симптомы, диагноз, степень тяжести заболевания).

5. Интеграция результатов. Объединение результатов анализа текста и речи для создания профиля пациента.
6. Интерпретация результатов. Завершающий этап заключается в предоставлении информации диагностики специалисту. Результат выводится в виде графиков, таблиц, схем или диаграмм, помогая специалистам быстро оценить состояние пациента и принять решение о дальнейших действиях.

Таким образом, внедрение современных технологий обработки естественного языка в диагностики невротических расстройств способствует улучшению качества оказания помощи специалистами, обеспечивает точность диагностики и повышая эффективность лечения.

При использовании технологий обработки естественного языка можно отметить преимущества:

1. Способность быстро анализировать большие объёмы данных.
2. Возможность раннего выявления признаков заболевания.
3. Автоматизация сбор данных. Применение алгоритмов машинного обучения помогает снизить нагрузку на медицинский персонал [5].

Несмотря на преимущества применения технологий естественного языка для анализа речи и текста существуют ряд ограничений:

1. Для успешного функционирования технологий обработки естественного языка для анализа речи и текста необходим доступ к объемам обработанных данных.
2. Сложности в обработки текстов, написанных нестандартным языком (разговорные выражения, иностранные языки), что существенно снижает уровень точности при обработке данных.
3. Возникновение этических проблем относительно соблюдение врачебной тайны, защиты пресильных данных пациентов и правильной интерпретации результатов диагностик.

Применение технологий обработки естественного языка для анализа речи и текста открывает значительные перспективы для улучшения диагностики и контроля невротических расстройств.

Однако их широкое внедрение сопряжено с необходимостью решения ряда задач, включая стандартизацию сбора и хранения медицинских данных, а также разработку чётких правовых и этических норм, гарантирующих конфиденциальность личной информации пациентов.

Использование таких технологий в диагностике невротических расстройств способно существенно повысить точность постановки диагнозов и выбора методов лечения, что, в свою очередь, способствует улучшению качества медицинской помощи населению.

## Библиографический список

1. Дмитриева, Н.В., Антилогова, Л.Н., Титаренко, Т.А. Невроз и конфликтность личности / Н.В. Дмитриева, Л.Н. Антилогова, Т.А. Титаренко // Психопедагогика в правоохранительных органах: научно-практический журнал. – Омск: ООО «ИВИС», 2020. С. 150-153.

2. Иванов, А.А., Петрова, В.В. Технологии искусственного интеллекта в психиатрии: анализ речи и текста: учебное пособие / А.А. Иванов, В.В. Петрова. – Москва: Медицина, 2023. – 210 с.

3. Кекелидзе, З.И., Чехонин, В.П. Клиническая психиатрия: руководство для врачей / З.И. Кекелидзе, В.П. Чехонин. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2022 – 250 с.
4. Кузнецов, М.П., Смирнов, Д.А. Диагностика психических расстройств на основе анализа текстовых данных: журнал неврологии и психиатрии / М.П. Кузнецов, Д.А. Смирнов. – Москва: Медицина, 2021. – С. 45-52.
5. Сидорова, Е.Н. Методы обработки естественного языка для медицинских приложений: учебное пособие / Е.Н. Сидорова. – Санкт-Петербург: Питер, 2022 – 185 с.
6. Шишкова, С.Ю., Воронова, А.А. «Нейрокоучинг – успех в твоей голове» / С.Ю. Шишкова, А.А. Воронова // Интеграция психологической практики и коучинга: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции Ассоциации практических психологов и коучей, Москва: АППК, 2023. С. 87-90.

© Макарова К.С., 2026

УДК 615.477.2

Н.А. МОЛДЫГАЛИЕВ
*moldygaliev@mail.ru*
Науч. руководов. – ассистент каф. БМИ, К.Р. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ЦИФРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ КУЛЬТЕПРИЕМНЫХ ГИЛЬЗ

*Аннотация.* Рассматриваются направления производства культеприемных гильз в условиях формирования нового этапа индустриального развития, под которой в рамках данного исследования понимается полностью автономное производство с применением искусственного интеллекта, самообучающихся цифровых двойников и минимизировать участие оператора

*Ключевые слова:* культеприемная гильза, 3D-сканирование, аддитивные технологии, цифровое моделирование, протезирование конечностей, персонализированное производство.

Протезирование конечностей на сегодняшний день представляет собой важное направление, находящееся на стыке медицины и инженерных технологий. Основной задачей данной области является не только восстановление утраченных функций, но и обеспечение комфортного и длительного использования протеза пациентом в повседневной жизни. Ключевую роль в этом процессе играет культеприемная гильза, которая

обеспечивает контакт между культей и протезом и во многом определяет удобство и эффективность его эксплуатации.

В практической деятельности изготовление гильз до сих пор часто осуществляется с применением традиционных методов, основанных на снятии гипсовых слепков и последующей ручной обработке моделей. Несмотря на отработанность данного подхода, он остаётся трудоёмким, требует значительного времени и во многом зависит от опыта специалиста. Это может приводить к неточностям при формировании геометрии изделия, что, в свою очередь, отражается на распределении нагрузки и уровне комфорта пациента.

В последние годы наблюдается активное внедрение цифровых технологий в различные отрасли промышленности, включая медицинское протезирование.

Использование трёхмерного сканирования, программного моделирования и аддитивного производства открывает новые возможности для повышения точности изготовления и сокращения сроков производства изделий. [2,**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

На сегодняшний день изготовление культеприемной гильзы, во многом сохраняет традиционные подходы, сложившиеся за предыдущие десятилетия. Несмотря на развитие материалов и компонентов протезных систем, ключевые этапы формирования гильзы по-прежнему выполняются с применением ручных технологий.

В большинстве случаев процесс начинается с получения слепка культи пациента, как правило, с использованием гипсовых бинтов или аналогичных материалов. [1] На основе полученного слепка формируется модель, которая затем подвергается ручной доработке. Специалист вносит изменения, ориентируясь на анатомические особенности пациента и предполагаемые зоны нагрузки, что требует опыта и практических навыков.

После подготовки модели осуществляется изготовление самой гильзы с применением композиционных материалов, включающих текстильные основы и полимерные связующие. На завершающем этапе проводится примерка изделия, в ходе которой нередко выявляются участки избыточного давления или недостаточной фиксации, что требует дополнительной коррекции.

Подобный подход, несмотря на свою распространённость, имеет ряд ограничений. В первую очередь, это высокая зависимость качества результата от квалификации техника-протезиста. Кроме того, процесс изготовления может занимать значительное время и включать несколько циклов доработки. Также стоит отметить, что при использовании традиционных методов отсутствует полноценная цифровая фиксация параметров изделия, что усложняет повторное изготовление и дальнейшую модернизацию протеза. [4]

Современный этап развития протезирования характеризуется переходом от частичной цифровизации к формированию полностью интегрированных цифровых производственных систем. В центре данного процесса находится

изготовление культеприемных гильз, как наиболее критичного элемента протеза, определяющего комфорт и функциональность его эксплуатации.

Внедрение цифровых технологий начинается с получения точной геометрии культи пациента с использованием трёхмерного сканирования. [7] Однако данный этап уже не рассматривается как изолированная операция, а становится частью единой цифровой экосистемы, включающей сбор, хранение и обработку медицинских данных. Полученная информация может автоматически передаваться в программные комплексы для дальнейшего анализа без участия оператора.

Ключевую роль в развитии данного направления играет внедрение технологий искусственного интеллекта. Алгоритмы машинного обучения способны анализировать большие массивы данных, включая геометрию культей, параметры предыдущих гильз и результаты их эксплуатации. На основе этих данных возможно автоматическое формирование оптимальной геометрии культеприемной гильзы с учётом распределения давления и индивидуальных особенностей пациента. Это позволяет значительно сократить зависимость от субъективных решений специалиста и повысить воспроизводимость результатов.

На этапе цифрового моделирования использование интеллектуальных систем открывает возможности для автоматической генерации конструкции изделия. Программное обеспечение может предлагать оптимальные формы, зоны разгрузки и усиления, а также проводить предварительное моделирование эксплуатационных нагрузок. Таким образом, проектирование гильзы переходит от ручного процесса к интеллектуально управляемому.

Важным элементом является полная автоматизация производственного цикла. Интеграция программных систем с аддитивным оборудованием позволяет реализовать концепцию "цифрового производства без разрыва", при которой модель, созданная в цифровой среде, напрямую передаётся на 3D-печать. При этом возможна автоматическая настройка параметров печати в зависимости от требуемых механических характеристик изделия. Так, например, использование технологий селективного лазерного спекания (SLS) позволяет создавать гильзы со сложной внутренней геометрией, недостижимой при ручном изготовлении.

Дополнительным направлением является создание цифровых двойников культеприемных гильз, позволяющих отслеживать их поведение в процессе эксплуатации. [6] Использование датчиков и систем мониторинга даёт возможность собирать данные о нагрузках и условиях использования, которые в дальнейшем могут быть использованы для корректировки конструкции и обучения алгоритмов искусственного интеллекта.

Количественно цифровой подход также демонстрирует преимущества. Если традиционное изготовление гильзы может занимать от двух до трёх дней на одну итерацию, а точность во многом зависит от квалификации техника, то

при использовании 3D-сканирования достигается субмиллиметровая точность (0,1–0,3 мм). При этом сама печать гильзы на 3D-принтере занимает около одного часа, а использование углеродного волокна в композите может повысить прочность изделия до 40%, по сравнению со стандартными термопластами (например, PLA или PETG).

Несмотря на очевидные преимущества цифровых и интеллектуальных технологий, их внедрение в сферу протезирования сопровождается рядом объективных трудностей. На практике переход к новым подходам требует не только технического переоснащения, но и изменения привычных производственных процессов.

Одним из основных сдерживающих факторов остаётся высокая стоимость оборудования. Использование 3D-сканеров, специализированного программного обеспечения и аддитивных установок требует значительных финансовых затрат, что ограничивает возможности широкого внедрения данных технологий, особенно в небольших ортопедических предприятиях.

Не менее важной проблемой является отсутствие единых стандартов и методик цифрового проектирования культеприемных гильз. В отличие от традиционных методов, где подходы отработаны годами практики, цифровое протезирование всё ещё находится на стадии активного формирования, что приводит к различиям в применяемых решениях и результатах. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

Также следует учитывать требования к квалификации специалистов. Работа с цифровыми моделями, программным обеспечением и оборудованием требует дополнительных знаний и навыков, выходящих за рамки классической подготовки техника-протезиста. Это делает необходимым развитие образовательных программ и повышение квалификации кадров.

Отдельного внимания заслуживают вопросы, связанные с эксплуатационными характеристиками материалов, используемых при аддитивном производстве. В ряде случаев такие параметры, как усталостная прочность при циклических нагрузках (особенно в дистальной части гильзы) и гидролитическая стабильность при повышенной влажности, могут уступать традиционным композитным решениям. Однако, как показывают исследования, добавление композитных материалов, например, углеродного волокна, и использование специальных режимов печати позволяет приблизить прочность 3D-печатных гильз к уровню стандартных ламинированных аналогов при соблюдении требований ISO 10328. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

В ходе работы были рассмотрены особенности современного производства культеприемных гильз и направления его дальнейшего развития. Анализ показал, что традиционные методы изготовления культеприемных гильз, несмотря на их распространённость, имеют ряд ограничений, связанных с трудоёмкостью и зависимостью от субъективных факторов.

Переход к цифровым технологиям, включая 3D-сканирование, моделирование и аддитивное производство, открывает возможности для повышения точности и сокращения времени изготовления изделий. При этом формирование элементов следующего этапа индустриального развития связано с более глубокой интеграцией интеллектуальных систем и созданием единого цифрового производственного процесса.

Несмотря на существующие ограничения, связанные с техническими и экономическими аспектами, развитие данных технологий представляется перспективным направлением. Их дальнейшее внедрение может способствовать кардинальному повышению качества протезирования, снижению зависимости от субъективного человеческого фактора и созданию более комфортных условий для пациентов, открывая путь к персонализированной реабилитационной медицине нового поколения.

## Библиографический список


1. Патент: RU2845358C1. *Способ изготовления индивидуальной культеприемной гильзы первичного экзопротеза голени* / О.Н. Ямщиков и др. — 2024.
2. Kim S. et al. 3D printed transtibial prosthetic sockets: A systematic review //Plos one. – 2022. – Т. 17. – №. 10. – С.
3. Описание технологии: Аддитивные технологии в медицине: учебное пособие / В.В. Попов, Г.В. Муллер-Камский, С.И. Степанов [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2023. – 92 с.
4. Тарасов А. Д. и др. Способ изготовления приёмной гильзы для протезов конечностей на базе технологии трёхмерной fgf-печати. [Электронный ресурс] –URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=82531713 (дата обращения: 03.05.2026).
5. Инновационные гильзы для экзопротезов [Электронный ресурс] // Центр общественного здоровья и медицинской профилактики. —— 2025. —— URL: mpmo.ru (дата обращения: 03.05.2026).
6. Янковский В. М. и др. Медицинские аспекты протезирования пациентов после ампутации на уровне голени с использованием цифровых технологий //Гений ортопедии. – 2022. – Т. 28. – №. 4. – С. 495-502.
7. Owen M. K., DesJardins J. D. Transtibial prosthetic socket strength: the use of ISO 10328 in the comparison of standard and 3D-printed sockets //JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics. – 2020. – Т. 32. – №. 2. – С. 93-100.
8. Культесканер – программно-аппаратный комплекс для создания протезов [Электронный ресурс] // pt.2035.university. – URL: pt.2035.university (дата обращения: 03.05.2026).
9. В Краснодаре разрабатывают цифровую модель культеприемных гильз для протезирования [Электронный ресурс] // kubnews.ru. – 26.09.2025. – URL: https://kubnews.ru/obshchestvo/2025/09/26/v-krasnodare-razrabatyvayut-

tsifrovuyu-model-kultepriemnykh-gilz-dlya-protezirovaniya/ (дата обращения: 03.05.2026).

10. ISO 10328:2016. Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses [Электронный ресурс] – URL: https://www.iso.org/standard/12345.html (дата обращения: 03.05.2026).

© Молдыгалиев Н.А., 2026

УДК 621.3

Н.А. МОЛДЫГАЛИЕВ
*moldygaliev@mail.ru*
Науч. руководв. – к.т.н., доцент каф. БМИ, Ю.О. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОРТАТИВНОГО ЭКС МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В SIMINTECH

*Аннотация.* В статье представлена имитационная модель портативного электрокардиостимулятора, созданная в среде SimInTech. Модель включает генератор зашумлённого кардиосигнала, аналоговую фильтрацию и программный модуль, реализующий алгоритм детекции R-зубца и принятия решения о стимуляции (режим Demand).

*Ключевые слова:* SimInTech, портативный электрокардиостимулятор, имитационное моделирование, алгоритм детекции R-зубца, Demand-стимуляция.

Разработка медицинских устройств с замкнутым контуром управления, таких как электрокардиостимуляторы (ЭКС), требует тщательной проверки алгоритмов обработки сигнала и принятия решений до этапа создания аппаратного прототипа. Имитационное моделирование позволяет безопасно и быстро оценить работу устройства при различных нарушениях ритма, не подвергая риску пациента. Цель данной работы — создание и верификация модели портативного ЭКС в среде SimInTech, воспроизводящей полный цикл: регистрация зашумлённого ЭКС → фильтрация → детекция R-зубца → формирование стимулирующего импульса при брадикардии.

Модель построена в среде динамического моделирования SimInTech, которая широко используется для проектирования систем управления в медицине и промышленности.

Генерация полезного сигнала и помех. Полезный сигнал имитируется блоком «Меандр» с амплитудой 5 мВ и частотой 1 Гц (соответствует ЧСС 60 уд/мин). Для приближения к реальным условиям на полезный сигнал

накладывается шум с равномерным распределением (блок «Шум»). Суммарный зашумлённый сигнал усиливается с коэффициентом 20 до уровня 100 мВ.

Аналоговая фильтрация. Для выделения кардиосигнала в полосе от 0,1 до 150 Гц используются два последовательных БИХ-фильтра Баттерворта: ФНЧ с частотой среза 150 Гц и ФВЧ с частотой среза 0,1 Гц. Такая конфигурация подавляет низкочастотный дрейф изолинии и высокочастотные мышечные артефакты.

Программный модуль обработки. Центральным элементом модели является блок «Язык программирования», в котором на С-подобном языке реализована логика микроконтроллера (рис. 1).

Алгоритм включает:

- преобразование аналогового сигнала в цифровую форму (имитация 10-битного АЦП);
- обнаружение R-зубца по превышению порога 0,5 В (после усиления и фильтрации);
- рефрактерный период 200 мс для исключения ложных срабатываний;
- если пауза между R-зубцами превышает 1200 мс (ЧСС < 50), формируется стимулирующий импульс длительностью 30 мс;
- после формирования импульса работа возвращается в режим ожидания (Demand).

Ниже приведён основной фрагмент кода, реализующий детекцию и принятие решения:

```
// ===== Пороги и времена (константы) =====
const float R_THRESHOLD = 0.5;      // порог обнаружения R-зубца, В
const float REFRACTORY_MS = 200.0;  // рефрактерный период, мс
const float PAUSE_TIMEOUT_MS = 1200.0; // таймаут для стимуляции, мс
const float STIM_DURATION_MS = 30.0;   // длительность импульса, мс

// ===== Основная логика =====
// 1. Обнаружение R-зубца
if (signal_volts > R_THRESHOLD && (t_ms - last_r_time) > REFRACTORY_MS) {
   last_r_time = t_ms;
   stim_active = 0;
   stim_pin = 0;
}
// 2. Запуск стимуляции при длительной паузе
if ((t_ms - last_r_time) > PAUSE_TIMEOUT_MS && !stim_active) {
   stim_active = 1;
   stim_start = t_ms;
   stim_pin = 1;
}
```

```
// 3. Выключение импульса по истечении длительности
if (stim_active && (t_ms - stim_start) > STIM_DURATION_MS) {
    stim_active = 0;
    stim_pin = 0;
}
```

Листинг 1 – Реализация алгоритма Demand-стимуляции на С-подобном языке

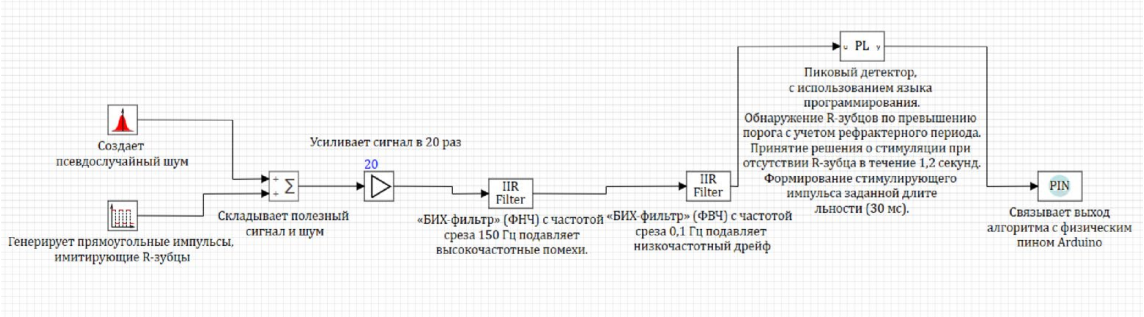



*Рис. 1* – Схема модели в SimInTech

При подаче на вход модели полезного сигнала с частотой 1 Гц и наложенным шумом алгоритм уверенно детектировал каждый R-зубец, а стимулирующий импульс не формировался (режим «запрета», нормальная работа). При искусственном пропадании полезного сигнала (имитация асистолии) через 1200 мс программный модуль генерировал импульс длительностью 30 мс. После восстановления собственного ритма стимуляция автоматически прекращалась, что соответствует требованиям к Demand-стимуляторам.

Параметры алгоритма, подтверждённые моделированием, сведены в таблицу 1.

*Таблица 1*

Основные параметры алгоритма детекции и стимуляции

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Порог обнаружения R-зубца | 0,5 В |
| Рефрактерный период | 200 мс |
| Таймаут паузы для запуска стимуляции | 1200 мс |
| Длительность стимулирующего импульса | 30 мс |
| Шаг дискретизации модели | 1 мс |

Разработанная модель корректно воспроизводит физический принцип работы портативного ЭКС. Её преимущество — возможность быстрой

настройки параметров (порога, таймаутов, длительности импульса) без перекомпиляции кода. В будущем модель может быть дополнена более реалистичным генератором ЭКС (с PQRST-формой) и подсистемой адаптации порога в зависимости от амплитуды предыдущих комплексов. Также модель позволяет оценить помехоустойчивость при варьировании уровня шума.

В среде SimInTech создана и верифицирована имитационная модель портативного ЭКС с алгоритмом Demand-стимуляции. Моделирование подтвердило: устойчивое детектирование R-зубца при отношении сигнал/шум, типичном для накожного отведения; корректное формирование стимулирующего импульса при паузе > 1200 мс; автоматическое прекращение стимуляции при восстановлении собственного ритма.

Полученная модель может использоваться для предварительной отработки алгоритмов временной кардиостимуляции и в качестве стенда для обучения медицинского персонала.

## Библиографический список

1. Гликберг, С. Л. SimInTech — среда динамического моделирования технических систем / С. Л. Гликберг, А. Л. Гликберг // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2012. — № 2. — С. 3–8.

2. SimInTech. Руководство пользователя : [Электронный ресурс] — URL: https://simintech.ru/ (дата обращения: 04.05.2026).

3. Ланцова, Л. А. Моделирование систем и процессов обработки сигналов в среде SimInTech / Л. А. Ланцова. — Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2019. — 85 с. — ISBN 978-5-94614-487-4.

4. Бамбиза, А. А. Применение программного комплекса SimInTech в задачах моделирования систем автоматического управления / А. А. Бамбиза, А. А. Малышев // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 4. — С. 27–34.

© Молдыгалиев Н.А., 2026

УДК 615.477.2

А.Б. МОРОЗОВ
*ded_moroz2001@mail.ru*
Науч. руковод. – д.т.н., проф. А.В. МЕСРОПЯН

***Уфимский университет науки и технологий***

# ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ БИОНИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ, АКТУАЛЬНЫЕ ПРОТОТИПЫ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

*Аннотация*. Проведён анализ актуальных тенденций развития бионических протезов с акцентом на переход от компенсаторной модели протезирования к концепции аугментации человека. Рассмотрены перспективные направления в области нейроинтеграции и органической биоэлектроники, включая разработку полностью имплантируемых интерфейсов и биогибридных систем.

*Ключевые слова*: бионический протез, нейроинтерфейс, биоэлектроника, аугментация человека, киборгизация, имплантируемые системы, нейроинтеграция, биосовместимость, реабилитационная робототехника.

## Перспективные направления: нейроинтеграция, биоэлектроника и киборгизация

Современный этап развития бионических систем управления характеризуется переходом к принципиально новым технологическим парадигмам, стирающим границы между биологическими и искусственными компонентами. Ведущие исследовательские центры, включая *MIT Media Lab* и *DARPA*, активно работают над созданием полностью имплантируемых нейроинтерфейсов нового поколения. В 2023 году компания *Synchron* добилась значительных успехов в клинических испытаниях стинт-электродов [1], вживляемых через кровеносные сосуды и позволяющих парализованным пациентам управлять цифровыми устройствами силой мысли. Этот прорыв открывает путь к разработке бионических систем с прямой нейронной интеграцией, не требующих внешних датчиков или сложных калибровок.

Учёные из Лундского университета (Швеция) разработали и испытали инновационную систему обработки и хранения больших объемов данных (рис. 1), которые ожидаются от будущих имплантируемых нейрокомпьютерных интерфейсов [2]. Данная система способна одновременно получать информацию от более чем одного миллиона нейронов в режиме реального времени. После конвертации, данные направляются на стандартные компьютеры для обработки и хранения. Система обеспечивает обратную связь со скоростью до 25 миллисекунд, стимулируя до ста тысяч нейронов. Предложенная технология может быть использована для

мониторинга мозга у пациентов с параличом, в том числе для отслеживания признаков эпилепсии, а также для обеспечения обратной связи в реальном времени для управления различными роботизированными руками у таких же пациентов.

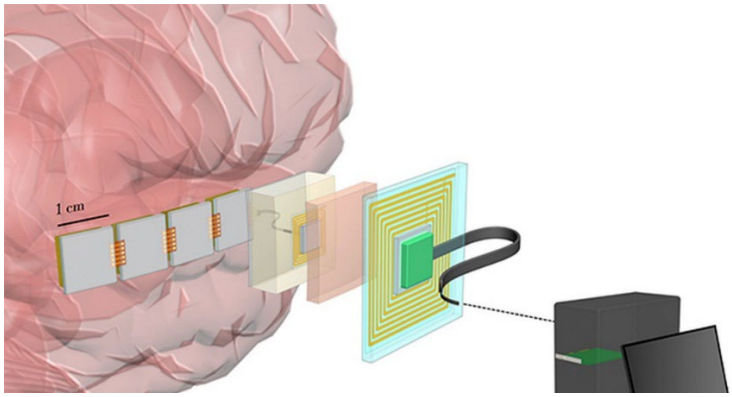



*Рис. 1.* Визуализация системы обработки и хранения больших объемов данных

Современные исследования сосредоточены на создании полностью имплантируемых бионических систем с прямой нейронной интеграцией:

1. Нейроинтерфейсы нового поколения*:*
- Эндоваскулярные стентроды (*Synchron*) - 16 электродов.
- Графеновые нейроинтерфейсы с плотностью 1000 контактов/см².
- Оптогенетические системы управления.
- Беспроводные интерфейсы с пропускной способностью до 200 Мбит/с.

2. Биогибридные технологии:
- Биосенсоры на основе углеродных нанотрубок.
- Органоидные нейрокомпьютерные интерфейсы.
- Искусственные мышцы из электроактивных полимеров.
- Васкуляризированные интерфейсы для долговременной имплантации.

3. Клинические испытания:
- Проект *BrainGate2* (96 электродов).
- Импланты *Blackrock Neurotech*.
- Российская система «Нейрочат».
- Европейский проект *NEBIAS*.

Перспективные разработки:
- Полностью имплантируемый бионический глаз (2026 г.).
- Нейропротез спинного мозга (2028 г.).
- Искусственная кожа с полным тактильным интерфейсом (2030 г.).

Эти направления требуют решения ключевых задач:
- Повышение биосовместимости материалов.
- Увеличение срока службы имплантов до 10+ лет.
- Снижение энергопотребления до 1 мВт.

• Обеспечение кибербезопасности нейроинтерфейсов.

Особое внимание в современных исследованиях уделяется разработке органической биоэлектроники. Ученые из Гарвардского университета создали гибридные нейропротезы [3], использующие проводящие полимеры и живые нейроны для создания «биологического интерфейса». В Швеции реализуется проект *e-OPRA Implant System* (рис. 2), где титановый имплант непосредственно соединяется с костью, мышцами и нервами, обеспечивая беспрецедентный уровень контроля над бионической конечностью. Параллельно развивается направление биосенсорики - в 2024 году японские исследователи представили искусственную кожу с функцией потоотделения и температурной регуляции, что критически важно для полноценной интеграции протезов с организмом.

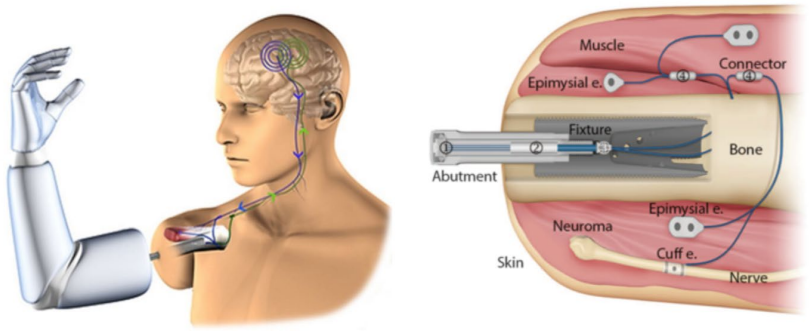



*Рис. 2*. Простая визуализация принципа работы *e-OPRA Implant System* и устройство протеза с интеграцией в культю человека

Футуристические концепции предполагают переход от протезирования к усилению человеческих возможностей. Проект «Киборг 2.0», реализуемый в Техническом университете Мюнхена, разрабатывает интерфейсы для управления дополнительными бионическими конечностями. Компания *Neuralink*, несмотря на существующие этические споры, демонстрирует прогресс в создании беспроводных мозговых имплантов с тысячами электродов [4]. Эксперты прогнозируют, что к 2035 году появятся первые коммерчески доступные системы, позволяющие не только компенсировать утраченные функции, но и расширять сенсорное восприятие (например, видеть в инфракрасном диапазоне или ощущать магнитные поля).

Следует отметить, что в контексте эволюции бионических технологий прослеживается отчетливый тренд перехода от компенсаторной модели протезирования к концепции аугментации человека. Иными словами, искусственные компоненты начинают выполнять функцию не только замещения утраченной конечности, но и инструментального расширения когнитивно-сенсорного аппарата. Данный сценарий развития, концептуально отраженный в эстетике киберпанка и набирающий популярность в массовой культуре, актуализирует междисциплинарный дискурс о допустимых границах добровольной бионической модификации и перспективах нормализации явления киборгизации в социуме.

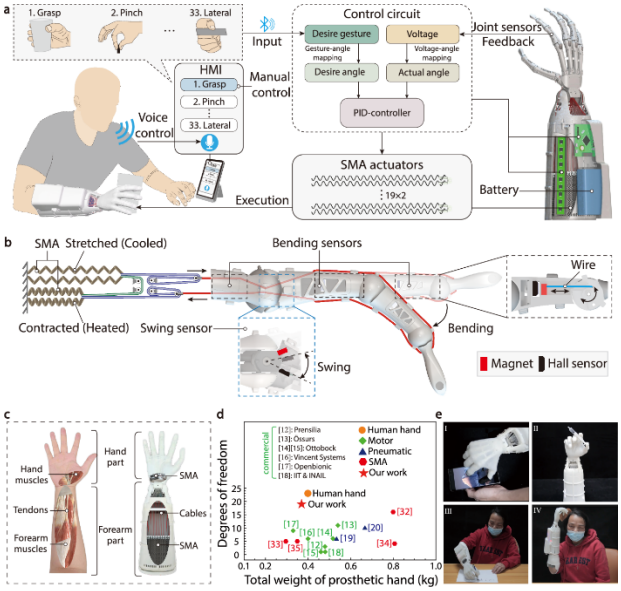



*Рис. 3.* Подробный обзор инновационного легкого протеза кисти с шарнирными сочленениями пальцев, разработанный китайскими инженерами (19 степеней свободы, когда у человеческой руки 23)

Несмотря на технологическую привлекательность аугментационного вектора, его практическая реализация сопряжена с существенными мировоззренческими и нормативными ограничениями. Во-первых, религиозная антропология многих конфессий исходит из принципа неприкосновенности образа и подобия, что вступает в конфликт с идеей произвольного функционального «улучшения» здоровых тканей и органов. Во-вторых, в рамках светской биоэтики остро стоит вопрос о справедливости распределения расширенных возможностей: высокотехнологичная аугментация рискует стать прерогативой узкой прослойки общества, усугубляя социальное неравенство до биологического уровня. В-третьих, феномен киборгизации актуализирует экзистенциальную проблему гибридной идентичности, ставя под сомнение традиционные критерии субъектности и автономии личности в условиях симбиоза с искусственным интеллектом и сенсорными надстройками. Данные факторы формируют значимый социокультурный барьер на пути перехода от медицинского протезирования к потребительской бионической модификации тела.

В связи с вышеперечисленными барьерами, этические и регуляторные аспекты становятся важнейшим фактором развития отрасли. В 2024 году ВОЗ выпустила первые международные рекомендации по кибернетическому протезированию [5], устанавливающие стандарты безопасности и конфиденциальности нейроинтерфейсов. Параллельно формируется новая отрасль права, регулирующая вопросы собственности на бионические модификации и защиту нейроданных. Технологический прогресс в этой области требует сбалансированного подхода, учитывающего как медицинские

потребности, так и потенциальные социальные последствия массовой киборгизации.

**Ограничения и вызовы в развитии бионических систем управления**

Несмотря на впечатляющие достижения, развитие бионических систем управления сталкивается с рядом существенных ограничений, замедляющих их широкое внедрение. Технические ограничения включают недостаточную энергоэффективность имплантируемых устройств - современные нейроинтерфейсы требуют частой замены батарей или сложных систем беспроводной зарядки. Проблема биосовместимости остается нерешенной: даже самые совершенные материалы вызывают реакцию отторжения при длительной имплантации. Точность управления по-прежнему уступает естественной биомеханике - современные бионические руки имеют задержку реакции 100-300 мс, что в 3-5 раз медленнее естественных конечностей [6].

С экономической точки зрения, высокая стоимость (от 20000 до 100 000 за продвинутые протезы) делает их недоступными для большинства пациентов [7]. Производственные мощности ограничены - мировой рынок может обеспечить лишь около 10% потребности в высокотехнологичных бионических решениях. Этические и правовые барьеры включают отсутствие международных стандартов безопасности для нейроинтерфейсов и нерешенные вопросы о праве собственности на бионические модификации тела.

Когнитивные ограничения проявляются в необходимости длительного обучения пользования сложными системами (до 6-12 месяцев для продвинутых нейропротезов). Психологическое неприятие «кибернетических» частей тела остается существенным барьером для многих пациентов. Кроме того, современные технологии не могут полностью воспроизвести тонкую тактильную чувствительность - разрешение сенсорной обратной связи в 10-20 раз ниже естественного осязания.

**Библиографический список**

1. Farina, D. *Man/Machine Interface Based on the Discharge Timings of Spinal Motor Neurons after Targeted Muscle Reinnervation* / D. Farina, N. Jiang // Nature Biomedical Engineering. – 2017. – Vol. 1. – P. 1-12.

2. Сычев, И. Разработано и протестировано новое решение для будущих имплантируемых нейрокомпьютерных интерфейсов [Электронный ресурс] / И. Сычев // Integral Russia: [сайт].– 2025.– 23 ноября.– URL: https://integral-russia.ru/2025/11/23/razrabotano-i-protestirovano-novoe-reshenie-dlya-budushhih-implantiruemyh-nejrokompyuternyh-interfejsov/

3. ETH Zurich. *Hybrid Neuroprosthetics: Combining Biological and Artificial Systems* / ETH Research Collection. – 2024. – 28 p.

4. Neuralink. *Advances in Brain-Machine Interfaces: Technical Report* / Neuralink Corp. – 2024. – 45 p.

5. ВОЗ. *Рекомендации по безопасности нейроинтерфейсов и бионических имплантов* / Всемирная организация здравоохранения. – Женева, 2023. – 89 с.

6. Micera, S. *Enhanced Tactile Feedback from Electronic Fingertips Could Improve Prosthetics, Robotics* / S. Micera, C. Cipriani // Science Robotics. – 2021. – Vol. 6, №58. – P. 1-10.

7. Chen, R. *Next-Generation Bionic Limbs with Self-Learning Algorithms* / R. Chen, L. Wang // Nature Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 5. – P. 345-357.

© Морозов А.Б., 2026

УДК 615.477.2

А.Б. МОРОЗОВ
*ded_moroz2001@mail.ru*
Науч. руковод. – д-р техн. наук, проф. А.В. МЕСРОПЯН

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРОТЕЗОВ ОТ ПРИМИТИВНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ КОНЕЧНОСТЕЙ ДО ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ УСТРОЙСТВ

*Аннотация*. Проведен комплексный анализ исторического развития, современного состояния и перспективных направлений эволюции систем управления бионическими системами. Особое внимание уделяется трем ключевым этапам: ранним механическим и электромеханическим решениям, цифровой революции с внедрением микропроцессоров и ИИ, а также новейшим разработкам в области нейроинтеграции и биоэлектроники.

*Ключевые слова*: протез, бионические системы, нейроинтерфейсы, биоэлектроника, миоэлектрика, микропроцессоры, машинное обучение, нейростимуляция.

## Введение

Бионические системы управления представляют собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений современной науки и техники, находящееся на стыке медицины, робототехники, нейрофизиологии и искусственного интеллекта. Эти технологии, зародившиеся как средство реабилитации людей с ограниченными возможностями, сегодня трансформируются в инструмент расширения человеческого потенциала, открывая новые горизонты для развития человеческой цивилизации.

Актуальность исследования эволюции систем управления бионическими системами обусловлена несколькими ключевыми факторами. Во-первых, по данным Всемирной организации здравоохранения [1], около 15% населения Земли (более 1 миллиарда человек) имеют те или иные формы инвалидности, причем значительная часть из них нуждается в современных протезных решениях. Во-вторых, стремительный прогресс в области нейроинтерфейсов и искусственного интеллекта создает принципиально новые возможности для

интеграции человека и машины. В-третьих, бионические технологии становятся важным элементом четвертой промышленной революции, формируя новые стандарты качества жизни и производительности труда.

## Ранние этапы развития. От механических протезов к электромеханическим системам

Первые попытки создания функциональных бионических систем восходят к древним временам, когда для замены утраченных конечностей использовались простейшие механические конструкции. Например, в средневековье появились деревянные протезы ног с шарнирными соединениями (рис. 1), а в XIX веке – более совершенные кожаные и металлические протезы рук с системой ремней и рычагов (рис. 2). Эти устройства позволяли выполнять базовые движения, но их управление требовало значительных физических усилий и не отличалось естественностью.



*Рис. 1.* Различные протезы средневековой эпохи



*Рис. 2.* Протез времен Первой мировой войны, найденный в Бельгии

Настоящий прорыв произошел в середине XX века с развитием электромеханических систем. В 1940–1950-х годах появились первые протезы, использующие миоэлектрический принцип управления (рис. 3а): датчики, закрепленные на коже, улавливали электрические сигналы от сокращения мышц культи и преобразовывали их в движение искусственной конечности. Одним из первых успешных примеров стал советский миоэлектрический протез руки, разработанный в 1960-х годах под руководством академика Якобсона [2] (рис. 3б). Однако эти системы имели существенные ограничения: низкую точность движений, малую скорость реакции и отсутствие обратной связи.

Дальнейшее совершенствование электромеханических протезов в 1970–1980-х годах было связано с миниатюризацией электронных компонентов и улучшением алгоритмов обработки сигналов. Появились протезы с несколькими степенями свободы, способные выполнять более сложные действия, например, захват предметов разной формы. Тем не менее, управление такими системами оставалось неинтуитивным и требовало длительного обучения. Эти ранние разработки заложили основу для последующего перехода к цифровым и интеллектуальным системам управления, открыв путь к созданию современных бионических технологий.

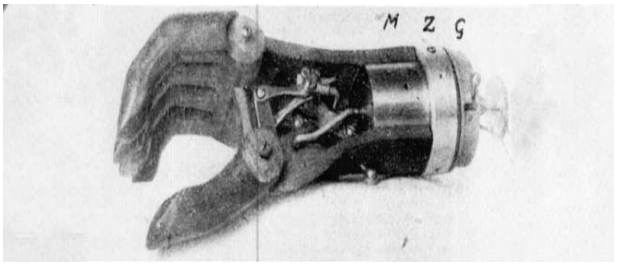


*Рис. 3а.* Первая попытка создать миоэлектрический протез в 1948 году не увенчалась успехом

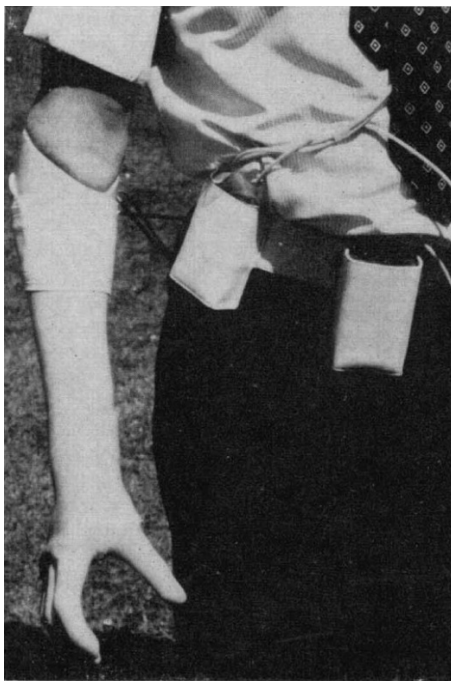


*Рис. 3б.* Фотография первого миоэлектрического протеза во время испытаний

**Цифровая революция: внедрение микропроцессоров и искусственного интеллекта**

Современный этап развития бионических протезов характеризуется глубокой интеграцией цифровых технологий, что привело к качественному скачку в функциональности и удобстве использования. Ключевые технологические достижения включают:

1. Микропроцессорное управление:

● Использование 32-битных процессоров *ARM Cortex* с тактовой частотой до 200 МГц.

● Реализация алгоритмов адаптивной фильтрации сигналов (Калмана, Винера).

● Частота опроса датчиков до 1000 Гц.

● Время отклика системы сократилось до 50-80 мс.

2. Машинное обучение:

• Применение *CNN* (сверточных нейросетей) для классификации паттернов ЭМГ.

• Использование рекуррентных сетей *LSTM* для прогнозирования движений.

• Системы глубинного обучения с обратной связью (*Deep Reinforcement Learning*).

• Точность распознавания намерений достигает 98,7%.

3. Тактильная обратная связь:

• Пьезоэлектрические актуаторы с частотой вибрации 50-500 Гц.

• Электротактильная стимуляция с регулируемым напряжением (0-50 В).

• Силовая обратная связь через сервомоторы с точностью 0,1 Н.

• Температурные датчики с разрешением 0,5°C.

Примеры современных систем:

• Протез *bebionic v4* с 14 режимами захвата.

• Протез *Michelangelo* от *Ottobock* с 7 степенями свободы.

• Российская разработка «Киберрука» с нейросетевым управлением.

Конец XX – начало XXI века ознаменовались переходом бионических систем управления на качественно новый уровень благодаря развитию микропроцессорных технологий и методов искусственного интеллекта. Появление компактных и мощных процессоров позволило реализовать сложные алгоритмы обработки сигналов в реальном времени. Это привело к созданию адаптивных протезов, способных автоматически подстраиваться под индивидуальные особенности пользователя. Например, современные бионические руки используют многоэлектродные миографические датчики, которые с высокой точностью декодируют мышечную активность и преобразуют ее в плавные, естественные движения.

Особую роль в эволюции систем управления сыграло внедрение машинного обучения. Нейросетевые алгоритмы научились распознавать сложные паттерны мышечной активности, предсказывать намерения пользователя и даже компенсировать неточности сигналов. В 2010-х годах появились первые коммерческие протезы с ИИ-управлением, такие как *bebionic* (*OTTO BOCK*) (рис. 4а) и *i-limb* (*Touch Bionics*) (рис. 4б), способные выполнять до 24 различных типов захватов [3]. Параллельно развивались нейроинтерфейсы – технологии, позволяющие управлять бионическими системами напрямую через мозговые импульсы. Пионером в этой области стала компания *BrainGate* [4], разработавшая в 2006 году первый успешный интерфейс «мозг-компьютер» для парализованных пациентов.




*Рис. 4а. bebionic* (*OTTO BOCK*)




*Рис. 4б. i-limb* (*Touch Bionics*)

Современные цифровые системы управления также включают элементы тактильной обратной связи. Инновационные разработки, такие как сенсорные матрицы на кончиках пальцев бионических протезов или вибрационная стимуляция, позволяют пользователям ощущать давление, температуру и текстуру предметов. В 2020 году группа исследователей из *ETH Zurich* и *EPFL* представила протез руки с полноценной сенсорной обратной связью [5], передающей сигналы через нейростимуляцию оставшихся нервных окончаний. Эти достижения сделали бионические системы по-настоящему интуитивными и функциональными, значительно улучшив качество жизни пользователей.

Дальнейшее развитие цифровых систем управления связано с интеграцией облачных технологий и интернета вещей (*IoT*). Умные протезы нового поколения, такие как *Hero Arm* от *Open Bionics* [6] (рис. 5), могут подключаться к смартфонам для обновления программного обеспечения, сбора статистики использования и даже дистанционной диагностики. Это открывает перспективы для создания самообучающихся бионических систем, которые будут непрерывно адаптироваться к потребностям пользователя в течение всего срока эксплуатации.

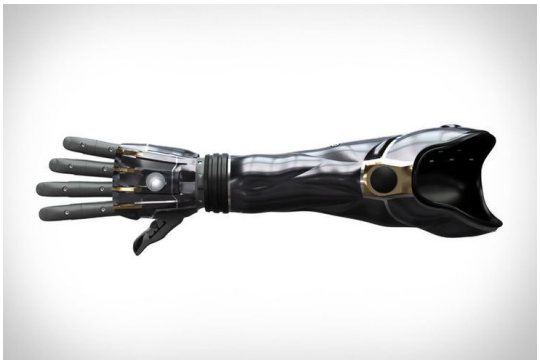


*Рис. 5*. Протез *Hero Arm* от *Open Bionics*

**Заключение**

Эволюция систем управления бионическими системами представляет собой впечатляющий пример технологического прогресса,

трансформировавшего реабилитационную медицину и расширившего границы человеческих возможностей. От примитивных механических протезов древности до современных нейрокомпьютерных интерфейсов, эта область прошла путь, сравнимый с научной фантастикой. Сегодня бионические системы достигли уровня, когда они не просто заменяют утраченные функции, но и открывают перспективы для расширения физических и когнитивных способностей человека.

Современные достижения в области нейропротезирования, биоэлектроники и искусственного интеллекта свидетельствуют о начале новой эры в развитии бионических технологий. Особенно значимы успехи в создании двусторонних нейроинтерфейсов, обеспечивающих не только управление протезом, но и полноценную сенсорную обратную связь. Разработка органической биоэлектроники и гибридных биосовместимых материалов приближает нас к созданию по-настоящему интегрированных с организмом человека кибернетических систем [7].

## Библиографический список

1. ВОЗ. *Рекомендации по безопасности нейроинтерфейсов и бионических имплантов* / Всемирная организация здравоохранения. – Женева, 2023. – 89 с.

2. Якобсон, Я.С. *Миоэлектрическое управление протезами верхних конечностей* / Я.С. Якобсон. – М.: Медицина, 1970. – 245 с.

3. Hochberg, L.R. *Neuronal Ensemble Control of Prosthetic Devices by a Human with Tetraplegia* / L.R. Hochberg, M.D. Serruya, G.M. Friehs // Nature. – 2006. – Vol. 442. – P. 164-171.

4. Соколов, А.В. *Нейроинтерфейсы и бионические протезы: современное состояние и перспективы* / А.В. Соколов, И.М. Петров // Вестник нейрокибернетики. – 2020. – №3. – С. 45-56.

5. Raspopovic, S. *Restoring Natural Sensory Feedback in Real-Time Bidirectional Hand Prostheses* / S. Raspopovic, M. Capogrosso, P.M. Rossini // Science Translational Medicine. – 2014. – Vol. 6, №222. – P. 1-10.

6. Open Bionics. *Hero Arm: User Experience and Clinical Outcomes* / Open Bionics White Paper. – 2024. – 32 p.

7. ETH Zurich. *Hybrid Neuroprosthetics: Combining Biological and Artificial Systems* / ETH Research Collection. – 2024. – 28 p.

© Морозов А.Б., 2026

УДК 615.477.21

С.С. МУРУГОВ
*semmur2004@gmail.com*
Науч. руковод. – ст. преподаватель каф. БМИ Н.С. ИВАНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ЭМГ-СЕНСОРЫ В ПРОТЕЗАХ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

*Аннотация*. В статье рассматривается роль электромиографических (ЭМГ) сенсоров в современных бионических протезах верхних конечностей. Описаны физические основы регистрации биопотенциалов, классификация ЭМГ-датчиков, их интеграция в системы микропроцессорного управления. Приведены примеры решения проблемы обратной связи и снижения стоимости протезов. Показаны перспективы развития сенсорных технологий для протезирования.

*Ключевые слова*: ЭМГ-сенсор, биопотенциал, протезы верхних конечностей, бионические протезы, микропроцессорное управление, обратная связь, электромиография, амплитуда сигнала.

Актуальность разработки и совершенствования ЭМГ-сенсоров для протезов верхних конечностей обусловлена высоким спросом на функциональные и естественные в управлении искусственные конечности. По данным за 2023 год, более 54% участников боевых действий получили травмы, требующие ампутации, причём у 20% из них ампутированы верхние конечности [1]. Кроме того, существует врождённая патология – аплазия, а также потери конечностей в результате несчастных случаев. Ключевым элементом бионического протеза, позволяющим использовать сигналы нервной системы, является ЭМГ-сенсор.

Электромиография как метод исследования берёт начало в XVIII веке, когда Л. Гальвани обнаружил электрическую активность в мышечных тканях лягушки. Однако практическое применение ЭМГ-сигналов для управления внешними устройствами стало возможным только во второй половине XX века с развитием микроэлектроники. Первые миоэлектрические протезы появились в 1960-х годах в СССР и Германии [3]. Сегодня ЭМГ-сенсоры являются стандартом для бионических протезов высокого класса.

ЭМГ-сенсор (электромиографический датчик) – это устройство, которое обнаруживает и измеряет электрическую активность, вырабатываемую мышечным сокращением [2]. Разность потенциалов между двумя точками живой ткани (биопотенциал) возникает вследствие деполяризации мембран мышечных волокон. Современные ЭМГ-сенсоры делятся на три типа:

Инвазивные (игольчатые) – используются в клинической диагностике, для протезов не применяются из-за травматичности.

Поверхностные (накожные) – наиболее распространены в протезировании. Они накладываются на кожу в области сохранных мышц культи. Сигнал снимается через гелевые электроды или сухие электроды из серебра/нержавеющей стали. Высокоинтегрированные матричные – представляют собой массивы из нескольких десятков микроэлектродов, позволяющие распознавать более сложные паттерны мышечной активности.

В бионических протезах применяются в основном поверхностные сенсоры благодаря их безопасности, простоте установки и неинвазивности. Типичный поверхностный ЭМГ-сенсор имеет коэффициент усиления 1000–5000, полосу пропускания 20–500 Гц и подавление синфазной помехи не менее 100 дБ [3].

В разрабатываемых и серийных протезах ЭМГ-сенсор входит в состав системы «биологический объект – датчик – фильтр – микропроцессор – приводы». Схема функционирует следующим образом (Рисунок 1):

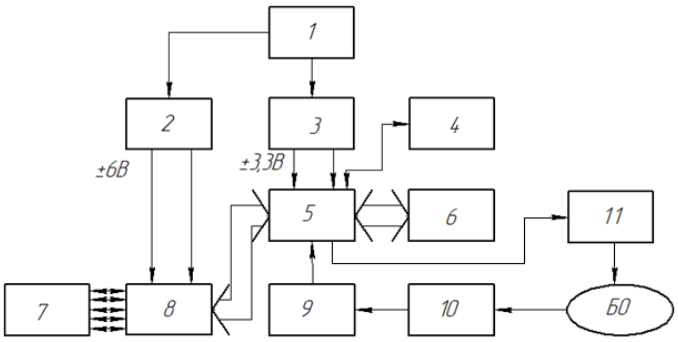



*Рис.1*

ЭМГ-сенсор 10 снимает биопотенциалы с мышц культи (биологический объект, БО). Аналоговый сигнал поступает в блок фильтрации 9, где удаляются артефакты движения, сетевая наводка 50 Гц и высокочастотный шум. Применяются полосовые фильтры Баттерворта 2-го порядка.

Отфильтрованный сигнал оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (обычно 10–12 бит) и передаётся в микропроцессор (МК) – например, ATMega2560 или более современный STM32.

Микропроцессор выделяет признаки: среднеквадратичное значение (RMS), длительность превышения порога, частоту пересечения нуля. На основе обученного классификатора (нейросеть или пороговая логика) распознаётся намерение пользователя выполнить одно из нескольких движений (схватить, разжать, повернуть кисть). Далее команда через плату управления 8 поступает на сервоприводы 7, которые приводят в движение пальцы или кисть протеза.

Существующие ЭМГ-сенсоры имеют ряд недостатков, которые частично удалось преодолеть в прототипе, описанном в работе [1]. Основной проблемой является отсутствие естественной обратной связи – пользователь не чувствует усилия сжатия и текстуру предмета. В предложенном решении используются вибромоторы 11, которые активируются при увеличении потребляемого тока сервоприводами, что косвенно указывает на контакт с объектом. Более

продвинутый метод – внедрение в ЭМГ-сенсор технологии тактильной обратной связи через электрокожную стимуляцию.

Вторая проблема – высокая стоимость промышленных ЭМГ-сенсоров (от 2000 долларов за канал). Решением стало использование дешёвых компонентов: операционных усилителей общего назначения (например, AD8232) и 3D-печатных корпусов. Это позволило снизить цену датчика до 50–100 долларов [1].

Третья проблема – низкая помехоустойчивость и дрейф нуля. Для её решения в схеме применён активный экранированный кабель и дифференциальный усилитель с высоким коэффициентом ослабления синфазной помехи (не менее 120 дБ). Также используется цифровая фильтрация в МК (скользящее среднее, режекторный фильтр 50 Гц).

Для питания ЭМГ-сенсора и всей схемы протеза предусмотрен литий-ионный аккумулятор 1 с преобразователями на 6 В и 3,3 В 2 и 3 [1]. Передача данных на компьютер и перепрограммирование МК осуществляется через интерфейс USB A 6 или беспроводно по Bluetooth 5. Это позволяет адаптировать пороги срабатывания и алгоритмы распознавания жестов под конкретного пациента без посещения лаборатории.

ЭМГ-сенсоры являются «сердцем» бионических протезов верхних конечностей. Благодаря развитию микроэлектроники, методов цифровой обработки сигналов и машинного обучения, сегодня возможна надёжная регистрация и интерпретация ЭМГ-сигналов даже при слабых сохранившихся мышцах. Будущее лежит в создании имплантируемых беспроводных ЭМГ-сенсоров с множеством каналов (64–128 электродов), что позволит инвалидам управлять протезом с точностью до каждого пальца. Также перспективно использование сухих текстолитовых электродов, не требующих геля, и интеграция ЭМГ-сенсоров с системами ИИ для предсказания намерения пользователя

**Библиографический список**

1. Круглов А.В. Антропология киборга : руководство по протезированию верхних конечностей / А.В. Круглов. – Москва : Эксмо, 2023. – 352 с.

2. Зерчанинова Е.И., Евдокимов В.В. Физиология возбудимых тканей : учебное пособие по нормальной физиологии / Е.И. Зерчанинова, В.В. Евдокимова. – Екатеринбург : ГБОУ ВПО «УГМУ», 2022. – 164 с.

3. Грузд Н.А., Суходолов Ю.В. Электромиографический сенсор и его применение в области протезирования конечностей / Н. А. Грузд, Ю. В. Суходолов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 112 с.

4. Николаев С.Г. Практикум по клинической электромиографии / С.Г. Николаев. – Иваново : ИвГМА, 2019. – 264 с.

5. Мерлетти Р., Паркер П. Электромиография: физиология, инженерные аспекты и неинвазивные применения / Р. Мерлетти, П. Паркер. – IEEE Press, 2021. – 512 с.

© Муругов С.С., 2026

УДК 616.214.8-008.1

Р.А. МУХАМЕТШИН
*radmil_mukhametshin@mail.ru*
Науч. руковод. – старший преподаватель кафедры БМИ, Э.Ю. АБДУЛЛИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И РЕАБИЛИТАЦИИ ОБОНЯТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ

*Аннотация.* В статье рассматривается инновационная разработка устройства для диагностики обонятельных нарушений (аносмии, гипосмии), актуальных в России на фоне постковидных осложнений, старения населения и роста нейродегенеративных заболеваний. Описана архитектура ольфактометра на базе микроконтроллера Atmega 128 с компрессором, клапанными системами, датчиком давления и интерфейсами связи с ПК.

*Ключевые слова:* ольфактометрия, аносмия, гипосмия, микроконтроллер Atmega 128, дозированная подача запаха, нейродегенеративные заболевания, когнитивные нарушения, инновационное медицинское устройство.

## Введение

Обоняние и вкус — ключевые сенсорные системы, нарушения которых (аносмия, гипосмия, дисгевзия) глубоко влияют на качество жизни. В России эта проблема особенно актуальна: в период пандемии COVID-19 до 67% переболевших столкнулись с потерей обоняния, причём у 7–10% симптомы сохранялись более года. Это запускает цепную реакцию: по данным Минздрава РФ, у 15% таких пациентов диагностированы депрессивные состояния. Ситуация усугубляется демографией: к 2030 году доля граждан старше 60 лет в России превысит 25%, а нейродегенеративные заболевания (болезнь Альцгеймера, Паркинсона) часто манифестируют с обонятельных нарушений. По данным Научного центра неврологии (2024г.), гипосмия предшествует когнитивному спаду у 80% пациентов на 5–8 лет. Эмоциональные расстройства — депрессия, тревога — становятся следствием сенсорных дисфункций: исследование НМИЦ психиатрии им. В.П. Сербского (2023г.) выявило клинически значимую тревожность у 40% пациентов с хронической аносмией. Доступность специализированной помощи в регионах остаётся низкой: до 60% жителей малых городов не могут пройти ольфактометрию, а информированность населения о связи сенсорных, эмоциональных и когнитивных расстройств недостаточна (только 18% россиян связывают потерю обоняния с риском депрессии).

Принцип работы устройства представленный на рисунке 1, основан на создании давления с помощью компрессора, от которого сжатый воздух по пневматической магистрали поступает к клапанным системам. Управление подачей пахучих веществ осуществляется через электромагнитные клапаны, после чего сформированный поток транспортируется по пневматическим каналам к маске, закрепленной на голове пациента. Контроль и координация всех этапов процесса осуществляется электронной системой управления. После завершения подачи запаха управляющий сигнал от микроконтроллера переводит клапаны в режим продувки, в результате чего система очищается от остатков вещества. Сменные контейнеры позволяют оперативно перенаправлять поток воздуха на другой источник запаха и быстро настраивать режимы воздействия.

Главной микросхемой DD1 является микроконтроллер Atmega 128 фирмы AVR Atmel. Микроконтроллер принимает управляющие сигналы от клавиатуры и ПК, обрабатывает их по заложенному алгоритму и формирует управляющие сигналы на выходных портах, которые далее поступают на транзисторные ключи и исполнительные устройства. Для задания тактовой частоты микроконтроллера используется внешний кварцевый резонатор ZQ1 HC-49S с частотой 8 МГц, подключенный к соответствующим выводам микроконтроллера, при этом конденсаторы C3 и C4 номиналом 15 пФ замыкают цепь генератора на общий провод, обеспечивая стабильную работу.

Компрессорная установка с ресивером создает и накапливает сжатый воздух, который через редуктор, в зависимости от положения ручки регулировки, поступает в пневматическую магистраль устройства с заданным давлением.

Клапанные системы принимают пневматический поток от компрессора и в зависимости от управляющих сигналов перенаправляют его либо через контейнеры с пахучими веществами, либо в линию продувки. Управляющие сигналы на клапаны формируются микроконтроллером и подаются на базы транзисторов VT1–VT13, которые работают в ключевом режиме и осуществляют коммутацию питания электромагнитных клапанов. Одновременно с этим с выходов микроконтроллера подается сигнал на светодиоды HL1–HL13, индицирующие активный канал подачи вещества на передней панели блока управления. Клапаны электрически подключаются через разъемы XS7–XS19.

Пневматические каналы соединяют выходы клапанов с контейнерами пахучих веществ, после чего сформированный ароматизированный поток направляется к маске пациента. Пластиковые контейнеры служат источниками запахов, и при необходимости поток воздуха может быть перенаправлен на другую кассету со сменными контейнерами. Маска, установленная на голове пациента, оснащена управляемыми впускными и выпускными клапанами, которые по командам микроконтроллера регулируют подачу запаха и процесс продувки.

Устройство позволяет оператору через органы управления или интерфейс ПК передавать параметры воздействия (длительность подачи, интервалы, выбор вещества), которые поступают на микроконтроллер, сохраняются в его памяти и используются при формировании управляющих сигналов.

В стандартном рабочем режиме основной поток воздуха со скоростью 1,5 л/мин в каждую ноздрю проходит через маску пациента, при этом в течение 3 секунд в него добавляется облако пахучего вещества. Для исключения тактильных ощущений при переключении запахов микроконтроллер переводит систему в режим непрерывного фонового потока со скоростью 0,25 л/мин в каждую ноздрю, в который затем впрыскивается дозированное количество ароматического вещества. Давление в магистрали и объем добавляемого вещества задаются как управляющие параметры, влияющие на концентрацию запаха.

Разъем XS5 предназначен для подключения к ПК. Обмен данными осуществляется через USB-UART преобразователь DD2 FT232, который преобразует USB-сигналы ПК в последовательный интерфейс UART, поступающий на микроконтроллер. Конденсатор C8 номиналом 0,1 мкФ подключен по цепи питания микросхемы и служит для подавления высокочастотных помех. Через ПК передаются команды управления и параметры эксперимента, которые затем обрабатываются микроконтроллером.

XS1 – разъем подключения клавиатуры, с которой сигналы нажатия клавиш поступают на входы микроконтроллера, обеспечивая ручное задание параметров и управление клапанами.

Пьезоэлектрический излучатель звука HPA17A BA1 используется для звукового оповещения. Управляющий сигнал с вывода микроконтроллера поступает на базу транзистора VT13, который усиливает ток и подает питание на излучатель.

XS2 – разъем подключения ЖК-индикатора LCD 1602, на который с микроконтроллера по управляющим и информационным линиям передаются данные о режиме работы устройства. Резисторы R1, R2 и R3 включены в цепи подсветки и контраста дисплея, обеспечивая корректное отображение информации.

Для контроля давления в пневматической магистрали используется датчик дифференциального давления BP1 MPX5010DP. Датчик подключен к воздушной линии после редуктора, а его выходной аналоговый сигнал поступает на вход АЦП микроконтроллера. Это позволяет системе управления в реальном времени отслеживать текущее давление и корректировать работу исполнительных устройств для поддержания заданных режимов.

Электропитание схемы подается через разъем XS6 от AC-DC преобразователя, который преобразует сетевое напряжение в постоянное. Блок питания RPS-75-5 подает стабилизированное напряжение на цепи управления и микроконтроллер, а повышающий DC-DC преобразователь DA1 LM2577 формирует необходимое напряжение для питания электромагнитных клапанов и индикаторов. Конденсаторы C9, C10, C11 и C12 включены по цепям питания

и выполняют фильтрацию пульсаций, обеспечивая стабильную работу всей системы.

Разъем XS3 установлен на печатной плате и объединяет сигналы управления транзисторами VT1–VT13. Выводы разъема подключены к коллекторным цепям транзисторных ключей, а также к шинам питания +12В и GND. Разъем XS4 является ответной частью на проводах, идущих к клапанным системам через промежуточные разъемы XS7–XS19.

Благодаря использованию экранированного разъема с шагом 2 мм достигается компактный монтаж, высокая надежность соединения в условиях возможной вибрации (компрессорная установка) и исключается ошибочное подключение каналов управления.

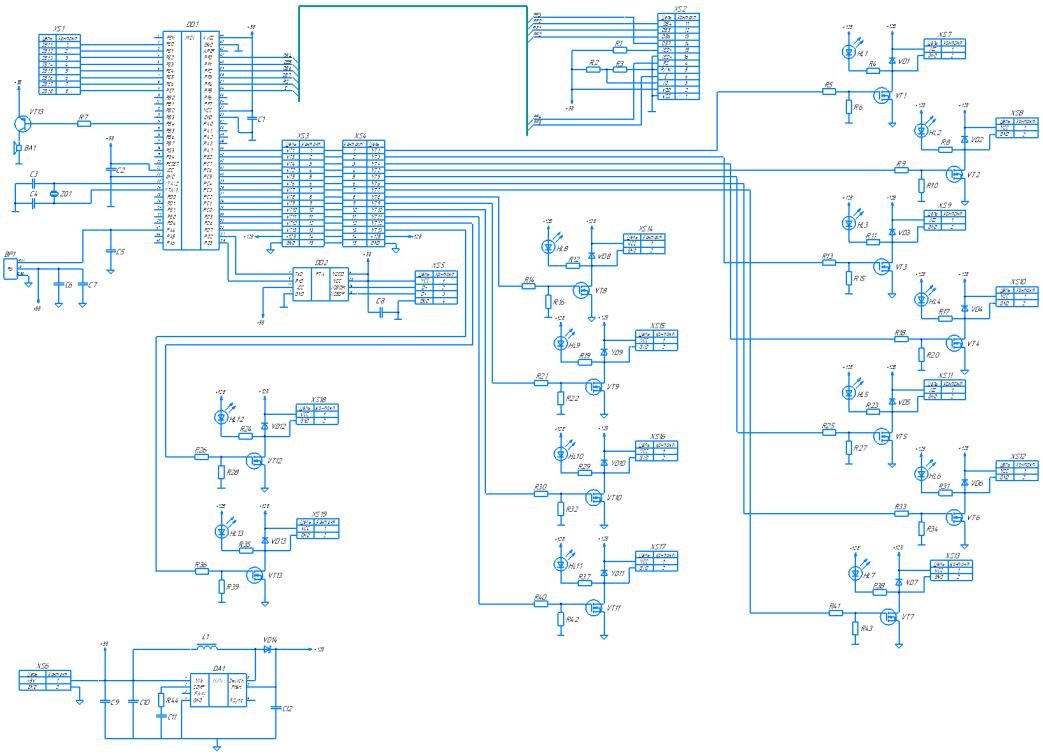


*Рис.1.* Принципиальная схема устройства для диагностики и реабилитации обонятельных нарушений

## Заключение

В данной работе был представлен инновационный подход к разработке устройства для диагностики и реабилитации обонятельных нарушений, ориентированный на российские реалии. Анализ статистических данных показал, что проблема аносмии и гипосмии носит системный характер: до 67% переболевших COVID-19 россиян сталкиваются с временной потерей обоняния, у 7–10% симптомы сохраняются более года, а у 15% развиваются депрессивные состояния. В условиях старения населения (к 2030 году доля граждан старше 60 лет превысит 25%) и высокой распространённости нейродегенеративных заболеваний, манифестирующих с обонятельных нарушений, потребность в доступной и точной ольфактометрии становится критической. При этом до 60%

жителей малых городов и сельской местности не могут пройти базовое исследование из-за отсутствия специализированного оборудования и кадров.

**Библиографический список**

1. Роспотребнадзор. Статистические данные по постковидным осложнениям в Российской Федерации (2021–2022 гг.) [Электронный ресурс]. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru

2. Минздрав РФ. Отчет о психическом здоровье населения в период пандемии COVID-19 (2021–2022 гг.). М., 2023. 45 с.

3. Росстат. Демографический прогноз Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru

4. Научный центр неврологии. Ранние маркеры нейродегенеративных заболеваний: обонятельные нарушения // Неврологический вестник. 2023. №С. 12–18

5. НМИЦ психиатрии и наркологии им. В.П. Сербского. Исследование взаимосвязи обонятельных нарушений и психических расстройств (2022 г.) [Электронный ресурс]. URL: https://serbsky.ru

6. Мухаметшин, Р. А. Разработка структурной схемы устройства для диагностики и реабилитации обонятельных нарушений / Р. А. Мухаметшин // Мавлютовские чтения: Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года. Том 3. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 174-178. – EDN CFLBGB

© Мухаметшин Р.А., 2026

УДК 004.932.4

А.А. РОЖКИНА
*anrozhkina@yandex.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент, З.И. ХАРИСОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ УЛУЧШЕНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО КАЧЕСТВА ДЕРМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

*Аннотация*. Предложен вычислительный метод предварительной цифровой фильтрации дерматологических изображений на основе морфологических операций. Метод включает разложение на цветовые каналы, локализацию и замещение пикселей волосяных структур, что позволяет повысить визуальное качество снимков для последующей классификации системами искусственного интеллекта.

*Ключевые слова*: дерматологические изображения; предварительная обработка; цифровая фильтрация; удаление волосяных структур; медицинские интеллектуальные системы.

Рост заболеваемости меланомой актуализирует разработку систем ранней диагностики на основе методов искусственного интеллекта (ИИ). Современные сверточные нейронные сети (CNN) демонстрируют высокую эффективность в классификации дерматологических изображений, однако их точность критически зависит от качества входных данных. [1]

При цифровом анализе визуальных данных значимые признаки изображений могут искажаться шумами различной природы, а также физиологическими факторами. Наличие волосяных структур на дерматологических снимках нарушает геометрические свойства области пигментного новообразования кожи. Подобные шумовые искажения способны существенно изменять размер, форму, цвет и текстуру пигментного поражения, что заметно влияет на итоговые результаты интеллектуального анализа. [2] Примеры дерматологических изображений, содержащих волосяные структуры для каждой диагностической категории, приведены на рис. 1.

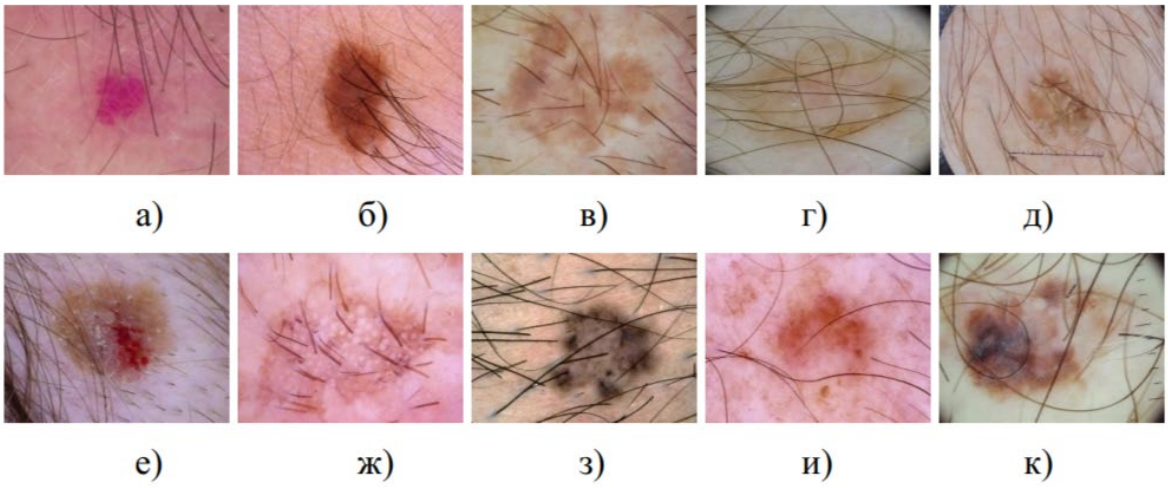



*Рис.1.* Примеры дерматологических изображений из категории: *а) сосудистые поражения; б) невусы; в) солнечные лентиго; г) дерматофибромы; д) себорейные кератозы; е) доброкачественные кератозы; ж) актинические кератозы; з) базальноклеточные карциномы; и) плоскоклеточные карциномы; к) меланомы*

Предварительная очистка изображений от шумов – один из ключевых этапов при разработке систем искусственного интеллекта. Самым распространённым методом устранения окклюзии пигментных образований кожи является механическое удаление видимых волос с помощью режущего инструмента до начала дерматоскопии. Однако это вызывает раздражение кожи, которое может приводить к диффузным изменениям цвета всего новообразования и искажать диагностически значимые признаки в большей степени, чем сами волосы. Альтернативой выступает оцифровка

дерматологических изображений с последующим программным удалением волосяных структур. Суть метода предварительной цифровой очистки заключается в классификации каждого пикселя как «волос» или «кожа» и последующей замене первых на вторые. Одним из способов такой идентификации и замены является предварительная цифровая фильтрация с использованием морфологических операций. В широком смысле под фильтрацией понимают обработку визуальных данных, на вход которой подаётся изображение, искаженное шумом, а на выходе формируется очищенное, максимально приближенное по характеристикам к эталонному [3]. Данная операция может быть описана формулой 1:

$$P_D[i,j] = P_D{}^{(2)}[i,j] - \aleph\,(k,l), \quad (1)$$

где $P_D[i,j]$ – пиксель зашумленного изображения; $P_D{}^{(2)}[i,j]$ – пиксель эталонного изображения без шума; $\aleph\,(k,l)$ – случайная шумовая компонента.

Морфологические операции позволяют изменять форму, размер и структуру выделяемых объектов переднего плана на изображениях, а также удалять шум и нежелательные детали, в том числе волосяные структуры. Операции дилатации и эрозии дают возможность увеличивать или уменьшать размеры объектов и сглаживать их контуры. Эрозия может применяться для удаления мелких объектов или пикселей шума, не соответствующих форме и размеру структурного элемента. Морфологические операции также могут быть использованы для выделения объектов переднего плана на обрабатываемых изображениях. Операция закрытия, представляющая собой последовательное применение дилатации и эрозии, заполняет небольшие полости и разрывы в объектах. Таким образом, морфологические операции выступают мощным инструментом предварительной обработки изображений, существенно повышая их визуальное качество [4]. Используя описанные возможности морфологических операций, предлагается вычислительный метод предварительной цифровой фильтрации дерматологических изображений, направленный на улучшение их визуального качества (формула 2):

$$D_{RGB}^{(cl)} = \phi_{RGB}^{(cl)}\left(D_{RGB}\left(d_{b_t}\right)\right), \quad (2)$$

где $D_{RGB}^{(cl)}$ – очищенное дерматологическое изображение; $D_{RGB}$ – исходное дерматологическое изображение, где *R, G, B* являются цветовыми составляющими красного, зеленого и синего каналов изображения, а $d_{b_t}$ представляет собой пигментное новообразование на изображении; $\phi_{RGB}^{(cl)}$ – оператор очистки волосяных структур.

Такая научная задача применима при ограничениях, описанных формулой 3:

$$\begin{cases} D_t(s,c,d) \in D_{Img}; \\ 1 \le M_1 \le 15; \\ 1 \le M_2 \le 6; \\ 1 \le V \le 70, \end{cases} \quad (3)$$

где $D_t(s,c,d)$ – исходное дерматологическое изображение заданного размера s = 450□600, цветовой модели c = *RGB* и битовой глубины d = 8; M – структурный элемент; V – порог значений интенсивности пикселей, задаваемый пользователем для оператора обнуления пикселей.

Разработанный метод предварительной обработки изображений пигментных новообразований кожи состоит из четырех основных этапов. На рис. 2 представлен алгоритм по обработке изображения кожи предложенным вычислительным методом идентификации и удаления волосяных структур.

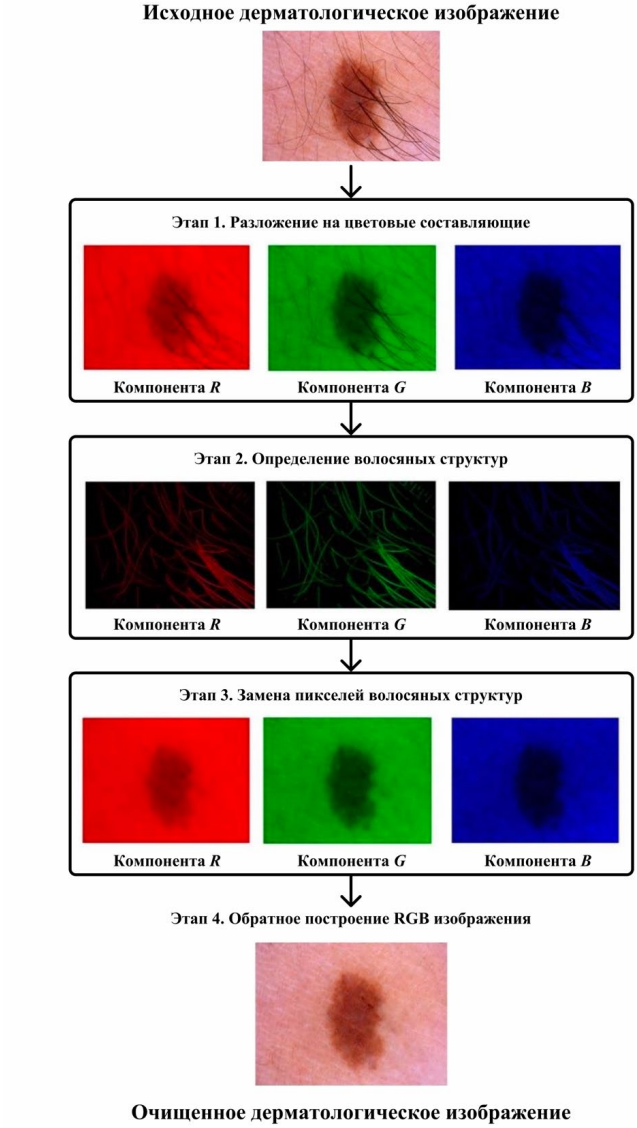



*Рис.2.* Поэтапная обработка дерматологического изображения предложенным вычислительным методом идентификации и удаления волосяных структур

Предложенный вычислительный метод включает четыре последовательных этапа. На первом этапе исходное RGB-изображение разлагается на отдельные цветовые каналы. Второй этап направлен на локализацию волосяных структур. На третьем этапе выполняется замещение пикселей, соответствующих волосам, значениями соседних пикселей. Четвертый этап заключается в обратной сборке цветного RGB-изображения дерматологического снимка. В итоге такая поэтапная обработка позволяет за счёт применения морфологических операций идентифицировать и удалять волосяные структуры.

Вычислительный метод предварительной цифровой фильтрации дерматологических изображений основан на морфологических операциях. В отличие от механического удаления волос, вызывающего раздражение кожи и дополнительные искажения, разработанный подход обеспечивает идентификацию и замещение волосяных структур на пиксельном уровне без внесения новых артефактов. Поэтапная обработка, включающая разложение на каналы, локализацию волос, замену пикселей, реконструкцию изображения, позволяет эффективно устранять шумы, повышая визуальное качество входных данных для систем искусственного интеллекта, что особенно важно для точной классификации пигментных новообразований кожи.

## Библиографический список

1. Esteva A., Kuprel B., Novoa R. A., et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks // Nature. – 2017. – Vol. 542, No. 7639. – P. 115–118.

2. Alphonse A. S., Benifa J. B., Muaad A. Y., Chola C., Heyat M. B. B., Murshed B. A. H., Al-Antari M. A. A hybrid stacked restricted Boltzmann machine with Sobel directional patterns for melanoma prediction in colored skin images // Diagnostics. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – P. 1104.

3. Lee T., Ng V., Gallagher R., Coldman A., McLean D. DullRazor®: A software approach to hair removal from images // Computers in Biology and Medicine. – 1997. – Vol. 27, No. 6. – P. 533–543.

4. Schmid-Saugeona P., Guillodb J., Thiran J. P. Towards a computer-aided diagnosis system for pigmented skin lesions // Computerized Medical Imaging and Graphics. – 2003. – Vol. 27, No. 1. – P. 65–78.

© Рожкина А.А., 2026

УДК 61.21.182

Д.С. САБИТОВА
*sabitova.diana.03@mail.ru*
Науч. руководитель – ст. преподаватель Н.С. ИВАНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГЕМОГЛОБИНОМЕТРА

*Аннотация.* В работе рассматривается техническая реализация принципиальной схемы цифрового гемоглобинометра. Описана работа основных функциональных узлов: оптического блока, системы усиления и фильтрации сигнала, а также микропроцессорного модуля. Особое внимание уделено выбору современной элементной базы, обеспечивающей суммарную погрешность измерений на уровне 0,14%.

*Ключевые слова:* гемоглобинометр, принципиальная схема, микроконтроллер ATmega128, фотодиод, фотометрия, медицинское приборостроение.

## Введение

Разработка принципиальной схемы гемоглобинометра базируется на необходимости автоматизации процесса измерения оптической плотности растворов по цианметгемоглобиновому методу на длине волны 540 нм. В отличие от существующих аналогов, предлагаемое решение объединяет в себе прецизионный аналоговый тракт и гибкую цифровую обработку данных на базе микроконтроллера представлена на рис.1.

Функционирование любого фотометрического прибора основывается на фундаментальном законе Бугера–Ламберта–Бера, который связывает ослабление интенсивности монохроматического света при прохождении через поглощающий слой вещества с его концентрацией. В клинической практике при анализе гемоглобина кровь подвергается химической модификации для перевода всех форм гемоглобина в стабильный гемиглобинцианид. Этот процесс позволяет свести многокомпонентную систему к однокомпонентному раствору, поглощающему излучение в узком спектральном диапазоне с максимумом около 540 нм.

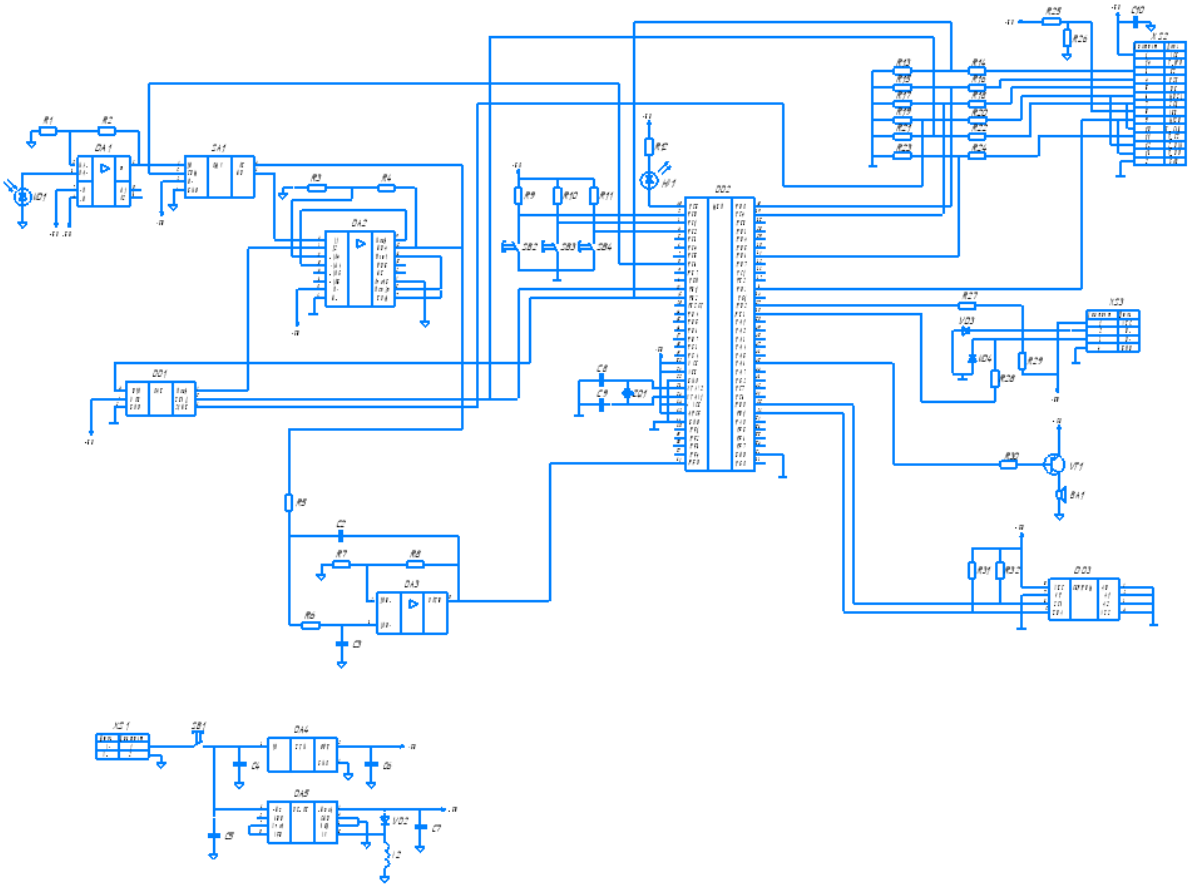


*Рис. 1*. Принципиальная схема гемоглобинометра

Проектируемое устройство построено на принципах модульности. Основной функциональный тракт разделен на три уровня: оптико-электронный, аналого-преобразовательный и управляющий.

1. Источник излучения и оптический узел:

Генератора светового потока выбран высокостабильный светодиод (LED) с длиной волны 540 нм. Использование узкополосного источника исключает необходимость установки дополнительных оптических фильтров, что упрощает конструкцию и снижает массогабаритные показатели прибора. Для устранения дрейфа интенсивности излучения, связанного с изменением температуры p-n перехода, в схему питания светодиода интегрирован прецизионный драйвер на базе операционного усилителя OPA2211, работающий в режиме стабилизации тока.

2. Фотоприемный тракт:

В качестве фотоприемника использован кремниевый фотодиод VBPW34S. Выбор обусловлен его высокой линейностью характеристики «свет-ток» в широком диапазоне освещенностей, а также крайне низкими собственными шумами. Электрический ток, генерируемый фотодиодом, преобразуется в напряжение с помощью малошумящего предусилителя, обеспечивающего необходимый коэффициент усиления для дальнейшей обработки.

3. Логарифмический преобразователь и нормализация сигнала:

Аналоговая обработка данных в представленной схеме является использование специализированной интегральной микросхемы LOG114. Выбор данного компонента продиктован необходимостью аппаратной реализации логарифмической функции для вычисления оптической плотности. В традиционных схемах оцифровка линейного сигнала фотодиода часто приводит к потере точности в области высоких плотностей (малых токов), так как шаг дискретизации АЦП становится соизмерим с полезным сигналом. Микросхема LOG114 выполняет операцию вычисления логарифма отношения двух токов: опорного и измерительного. Опорный ток формируется прецизионным источником, что позволяет нивелировать дрейф характеристик излучателя. Использование прецизионного операционного усилителя OPA2211 на этапе предварительного усиления гарантирует минимальный температурный дрейф и сверхнизкий уровень вносимых искажений. В результате на вход аналого-цифрового преобразователя поступает сигнал, уже пропорциональный концентрации гемоглобина, что значительно расширяет динамический диапазон прибора и упрощает математическую обработку данных.

4. Микропроцессорный модуль управления и цифровой тракт:

Центральным вычислительным ядром системы выступает микроконтроллер ATmega128. Выбор данной архитектуры обусловлен оптимальным соотношением производительности, наличия необходимых интерфейсов и низкого энергопотребления, что критично для портативного устройства.

Для обеспечения высокой достоверности результатов в программное обеспечение устройства внедрен комплекс методов цифровой фильтрации. Поскольку медицинское оборудование часто эксплуатируется в условиях высокого уровня электромагнитных помех, в цифровом тракте реализован алгоритм медианной фильтрации, позволяющий эффективно отсекать импульсные наводки. Кроме того, применяется процедура усреднения по выборке из 64 последовательных отсчетов, что повышает отношение сигнал/шум. Процесс измерения включает этап автоматической установки «нуля» по холостой пробе, что исключает влияние мутности реагента или загрязнения оптических элементов на конечный результат.

В ходе тестирования разработанной принципиальной схемы были получены данные, подтверждающие высокую линейность измерительного тракта в диапазоне концентраций гемоглобина от 20 до 220 г/л. Суммарная погрешность, включающая инструментальную составляющую и погрешность квантования, составила не более 0,14%.

Разработанная и технически обоснованная принципиальная электрическая схема цифрового гемоглобинометра представляет собой законченное инженерное решение для задач экспресс-диагностики. Интеграция прецизионных аналоговых компонентов, таких как LOG114 и OPA2211, с микропроцессорным управлением на базе ATmega128 позволила создать устройство с высокими метрологическими характеристиками при сохранении портативности и автономности.

**Библиографический список**

1. Гребенщиков А.В. (ред.) Лабораторная диагностика: Учебное пособие. – М.: МЕДпресс-информ, 2021. – 328 с.
2. Патент РФ № 2783512. Гемоглобинометр с автоматической калибровкой / Е.Е. Кузнецов, 2022.
3. Кузьмин А.В. Фотометрические методы измерения концентрации гемоглобина. – М.: Наука, 2019. – 152 с.
4. Белов П.Ю., Тюрин В.М. Микроконтроллерные измерительные системы в медицинской технике. – СПб.: Питер, 2020. – 208 с.
5. Сафин И.Р., Ахметова Л.В. Фотометрические методы в биомедицинских исследованиях. – Казань: КНИТУ, 2020. – 180 с

© Сабитова Д.С., 2026

УДК 616.77

А.Р. САФИУЛЛИН
*arsen-safiullin@mail.ru*
Науч. руководитель – ассистент кафедры биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «УУНиТ» К.Р. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРОТЕЗНО-ОРТОПЕДИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ И ИХ ОБРАТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

*Аннотация.* В данной статье рассматривается изготовления протезно-ортопедических изделий по технологии обратного проектирования с помощью 3Д-сканера, а также виды 3Д-сканеров и их возможности.

*Ключевые слова:* протезно-ортопедические изделия, 3Д-сканирование, аддитивные технологии в медико-биологической практике.

На сегодняшний день в числе инвалидов с травмами опорно-двигательного аппарата составляют не менее 39,6% от их общего числа [1].

Таким образом, проблема персонализации при изготовлении протезно-ортопедических изделий является актуальной на данный момент. В связи с этим целью данной работы является анализ научно-технической литературы и описание возможностей в Российской Федерации проведения работ в данной области.

Для инвалидов с травмами опорно-двигательного аппарата индивидуально изготавливаются специальные протезно-ортопедические изделия, такие как: аппараты, туторы, бандажи, корсеты, протезы и т.д. [2] Большинство из этих изделий имеет жёсткую конструкцию, в связи с чем их изготовление должно сопровождаться с постоянным контролем размеров.

Так, например, при изготовлении аппаратов и культеприёмных гильз одним из самых распространённых способов является гипсовая технология. Данная технология включает в себя несколько этапов [3]. Сначала с культи снимают слепок — для этого применяют гипсовую, создавая негативную форму. Затем в полученный слепок заливают гипс, отливая таким образом позитивную модель — точную копию культи. После этого протезист вручную корректирует форму модели: снимает избыточный объём в зонах повышенного давления (например, над костными выступами) и, при необходимости, добавляет материал для более равномерного распределения нагрузки. Далее на скорректированную модель накладывают лист термопластика (такого как ПЭТГ, полипропилен, полиэтилен или кополиэфир), нагревают его и формуют по модели с помощью вакуума или вручную — так получают гильзу протеза. Завершающий этап включает обрезку лишних краёв, шлифовку и полировку кромок, а также установку соединительных элементов, необходимых для крепления коленного модуля или других компонентов протеза.

Процесс изготовления изделия гипсовым методом занимает много времени, а также наносит вред врачу-протезисту, так как при обработке слепка выделяется много пыли, а при смешивании эпоксидной смолы с отвердителем для отливки изделия выделяется большое количество газов. Это делает процесс изготовления протезно-ортопедических изделий не безопасным и требует использование СИЗ для врача-протезиста. Кроме того, ручная коррекция гипсовой модели требует значительных физических усилий и высокой точности, что увеличивает нагрузку на специалиста и снижает общую эффективность процесса и повышает риск погрешностей размеров.

Существует более эффективный и точный метод получения позитивной модели изделия. Он заключается в том, что снятие слепка происходит с помощью 3Д-сканера. Это современный бесконтактный метод получения цифровой копии части тела без использования расходных материалов, что делает производство более дешевым и точным.

Получение позитивной модели способом 3Д-сканирования делится на несколько этапов:

1. Подготовка пациента: кожу культи очищают, при необходимости обезжиривают и наносят матирующий спрей, в случае использования оптического сканера.
2. Позиционирование: важно расположить часть тела так, чтобы она оставалась неподвижной всё время сканирования с естественным положением тканей.
3. Сканирование: строится точная трёхмерная модель поверхности сканируемого объекта на экране компьютера. Занимает около 10 минут [4].
4. Обработка полученной 3Д-модели: удаляются артефакты и шумы; закрываются места, где сканер не достал; по необходимости добавляется или убирается объём модели с целью правильного построения жёсткой конструкции и размещения мягких тканей.

Существует 2 вида 3Д-сканера [5]:

1. Лазерные. Работают с использованием лазера по принципу лазерного излучения. Точные точечные измерения могут быть выполнены путем вычисления угла отражения лазерного излучения. Таким образом проецируются миллионы точек, называемые облаком точек, каждая из которых имеет свои координаты в пространстве.

Преимущества: слабо зависят от условий освещенности объекта [6]; способен сканировать блестящие и тёмные поверхности.

Недостатки: не могут применяться на движущихся объектах.

Примером лазерного сканера может послужить отечественный Scanform L5, разработанный резидентами фонда Сколково. Работает по технологии триангуляции лазерной сетки и может использоваться для обратного проектирования.

2. Оптические. Работают, проецируя на объекте световой рисунок, состоящий из различных форм, таких как полосы, блоки и т.д. Имеют несколько датчиков, отслеживающих края используемых форм, используя метод триангуляции.

Преимущества: портативность; возможность получения цветных 3Д-сканов; высокая скорость сканирования; безопасны для глаз людей и животных.

Недостатки: для сканирования блестящих, прозрачных и черных предметов требуется матирующий спрей; представляют трудность в работе с большими объектами, такие как памятники и здания.

Примером оптического сканера может послужить отечественный RangeVision Spectrum. Работает по технологии триангуляции заданного изображения и может использоваться для обратного проектирования.

Таким образом, анализ научно-технической литературы и описание возможностей в Российской Федерации проведения работ в данной области показало, что благодаря применению 3D-сканирования и аддитивного технологического процесса достигается производство протезно-ортопедических изделий такого же качества, что и при использовании традиционных гипсовых технологий, но при этом значительно сокращается продолжительность их изготовления, снижаются финансовые затраты на обеспечение пациентов протезно-ортопедическими изделиями, повышается степень удовлетворения потребности населения в протезно-ортопедических изделиях. [1]

## Библиографический список

1. Пономаренко Г.Н., Щербина К.К., Буров Г.Н., Большаков В.А., Черникова М.В. Первому в России центру реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта 140 лет // Медицина и организация здравоохранения. 2023. Т. 8. No 2. С. 107–118. DOI: https://doi.org/10.56871/MHCO.2023.79.32.011

2. Пономаренко Г. Н. (д-р мед. наук) Медицинская реабилитация пациентов после ампутаций конечностей вследствие боевой травмы методическое пособие / Г. Н. Пономаренко, К. К. Щербина, Б. Н. Хубутия;

Федеральный научный центр реабилитации инвалидов имени Г. А. Альбрехта Минтруда России. — Санкт-Петербург : ФНЦРИ, 2022. — 53 с. ил.; 21. — ISBN 978-5-6042965-8-5.

3. [Электронный ресурс]: Процесс изготовление протеза – Режим доступа: https://mlotos.ru/articles/process_izgotovleniya_proteza/?ysclid=mgglddufwh93975 (дата обращения: 25.09.2025)

4. [Электронный ресурс]: От 3D-сканирования до 3D-печати: сотрудничество с изготовителем культеприемных гильз Vytruve – Режим доступа: https://www.shining3d.ru/blog/ot-3d-skanirovaniya-do-3d-pechati-sotrudnichestvo-s-izgotovitelem-kultepriemnyh-gilz-vytruve/?ysclid=mgglkfo2f6979057277#_3D-___Vytruve_SHINING_3D) (дата обращения: 28.09.2025)

5. [Электронный ресурс]: Цветной мир – Режим доступа: https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/printsipy-raboty-3d-skanera-vidy-skanerov-tekhnologii-i-metody-skanirovaniya/#title-dop1-1(дата обращения: 01.10.2025)

6. [Электронный ресурс]: Технологии 3D-сканирования: основные методы, преимущества и недостатки – Режим доступа: https://3dtool.ru/stati/tekhnologii-3d-skanirovaniya-osnovnye-metody-preimushchestva-i-nedostatki/?ysclid=mggv3b0lh257415495 (дата обращения: 02.10.2025)

© Сафиуллин А.Р., 2026

УДК 616-089.844

А.Р. СУЛТАНМУРАТОВА
*kamilasultanmuratova@gmail.com*
Науч.руководит. – ассистент каф. БМИ, Д.Ш. БАГАУТДИНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА BLENDER ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ КОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

*Аннотация.* Технологии трёхмерного моделирования всё активнее внедряются в медицину — от планирования операций до изготовления имплантов, адаптированных под конкретного пациента. Бесплатный и открытый пакет Blender даёт врачам полноценный набор инструментов для подобных задач, позволяя отказаться от дорогого коммерческого ПО.

*Ключевые слова:* трёхмерное моделирование, среда Blender, биомедицинская инженерия, персонализированная медицина, аддитивные технологии, компьютерная симуляция.

Сегодня реконструктивная хирургия всё заметнее смещается в сторону персональных решений. Тиражные имплантаты далеко не всегда способны отразить уникальную геометрию дефекта, естественные искривления костных поверхностей и возрастную перестройку ткани. Ответом на этот вызов стала технологическая цепочка, в основе которой лежат трёхмерная реконструкция КТ-данных и последующее аддитивное изготовление конструкции. Комплексы программно-аппаратных средств, объединяемые термином Computer Aided Surgery (CAS), ориентированы на улучшение диагностики, детализированное планирование вмешательства, виртуальные тренировки хирурга и повышение точности самих манипуляций [1].

Центральное место в этой связке занимает софт для 3D-моделирования. В течение длительного времени здесь господствовали дорогие коммерческие пакеты: Mimics (Materialise, Бельгия), Amira (Visage Imaging, США), Trauma Cad и CMF iPlan (Brain lab, Германия). Все они страдают общими недостатками — неподъёмной ценой, недоступностью технической поддержки на русском языке и жёсткой привязкой к ограниченному перечню имплантатов западных брендов, что практически исключает внедрение отечественных разработок. В частности, Trauma Cad полностью лишена трёхмерного представления, заставляя врача довольствоваться только плоскостными рентгенограммами.

В качестве более демократичной альтернативы всё активнее рассматривают открытый пакет Blender. По сути, это универсальная среда, соединяющая в себе инструменты пространственного моделирования, анимации и фотореалистичной визуализации. Помимо общедоступного исходного кода и связанной с этим нулевой стоимости, программа привлекает внутренней целостностью и практически неисчерпаемым арсеналом встроенных средств [2] . Вывести Blender на один уровень с такими расчётными платформами, как MathLab, позволяет интегрированный интерпретатор Python. Скриптовый язык обеспечивает всеобъемлющий контроль над функциями редактора и, что особенно ценно, открывает доступ к обширному массиву научных библиотек, созданных мировым сообществом.

Лично я вижу преимущество Blender перед классическими математическими средами не только в богатстве инструментов, но и в продуманном графическом интерфейсе, который заметно экономит время и упрощает погружение в тему. Впрочем, нельзя умолчать и о слабых сторонах: проектирование объектов с жёстко заданными размерами вызывает сложности, и организация рабочего пространства поначалу кажется непривычной.

Сравнительный анализ функциональных возможностей Blender и коммерческих аналогов представлен в таблице 1.

*Таблица 1*

Сравнительный анализ программных средств для проектирования костных имплантов

| Характеристика | Blender | Mimics (Materialise) | Trauma Cad/CMF iPlan (Brain lab) |
|---|---|---|---|
| Стоимость лицензии | Бесплатно | От 800 000 руб./год | Коммерческая, высокая |
| Открытый исходный код | Да | Нет | Нет |
| Поддержка Python API | Да | Нет | Нет |
| Техническая поддержка в России | Открытое сообщество | Отсутствует | Отсутствует |
| Работа с 3D-изображениями | Да | Да | Только 2D |
| Скульптинг анатомии | Да | Ограничено | Нет |
| Анимация и динамика | Да | Нет | Нет |
| Встроенный рендеринг | Да | Ограничено | Нет |
| Поддержка VR-режима | Да | Нет | Нет |
| Молекулярное моделирование | Да | Нет | Нет |
| Сложность освоения | Требует обучения | Трудна в освоении | Средняя |

Blender при нулевой стоимости обеспечивает более широкий функционал по сравнению с коммерческими аналогами. Открытость кода и поддержка Python API позволяют адаптировать программу под любые исследовательские задачи, а отсутствие привязки к конкретным производителям имплантатов делает платформу особенно привлекательной для клиник и лабораторий.

Пожалуй, главным барьером на пути массового использования Blender в роли полноценной среды математического моделирования пока остаётся нехватка систематизированных руководств и обучающих материалов по Python API — ситуация, впрочем, типичная для многих опенсорсных проектов . Однако опыт говорит о том, что и в текущем состоянии платформа даёт возможность сравнительно легко и оперативно строить точные пространственные модели, поверхность которых задана аналитически или численно.

Стартовая точка разработки индивидуального имплантата — обработка КТ-снимков. Исходные файлы в формате DICOM загружают в программу-сегментатор. В клинической практике равноправно применяются как коммерческие, так и открытые платформы, например InVesalius 3.0 и 3D Slicer [14]. Современные томографы обеспечивают размер вокселя до 0,1 мм, что гарантирует высокую точность будущих построений [1]. Под сегментацией понимают процесс разделения изображений на анатомически значимые зоны.

Полученные трёхмерные реконструкции экспортируют в формат STL, где поверхность детали аппроксимируется множеством треугольников.

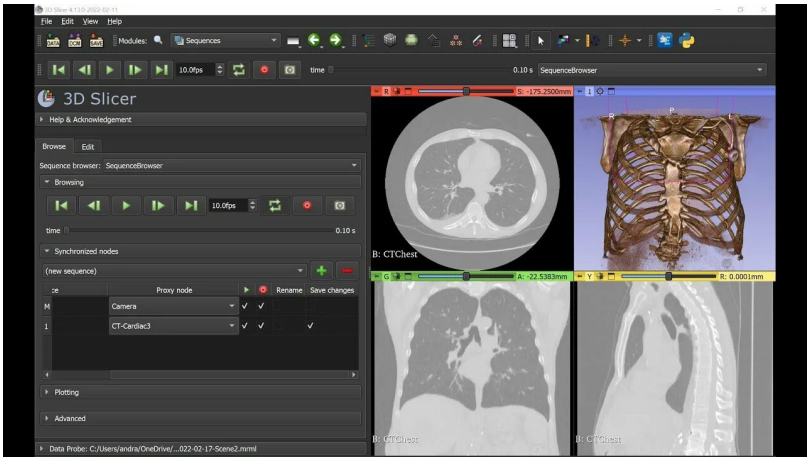



*Рис.1* Интерфейс программы 3D Slicer с загруженными DICOM-снимками КТ грудной клетки.

На первых порах импортированная в Blender модель обладает хаотичной полигональной сеткой и нуждается в доработке. В распоряжении пользователя — скульптинг, полигональное и криволинейное моделирование, позволяющие добиваться как высокой сложности, так и реалистичности. Базовым типом объектов выступают mesh-структуры — трёхмерные каркасы. Часто для их построения прибегают к конвертации из набора NURBS-кривых. Эти направляющие, родственные кривым Безье, но описываемые иным математическим аппаратом, дают возможность гибко задать плоский контур практически любой сложности. Затем экструзией контур превращают в объёмное тело, которое преобразуют в полигональную сетку. Поскольку живым тканям несвойственны острые кромки, к mesh-объектам применяют сглаживающий модификатор Smooth [3].

После подготовки анатомической модели приступают к проектированию имплантата. Если необходимо воссоздать утраченный фрагмент кости путём зеркального отражения сохранной стороны, используют симметричную реконструкцию: здоровую контралатеральную область отражают относительно срединной плоскости и полученную поверхность стыкуют с краями дефекта. Ещё на дооперационном этапе на базе КТ строится виртуальная трёхмерная модель, с которой затем печатается пластиковый прототип. Этот прототип стерилизуют в формалиновой камере и применяют в операционной для точного макетирования: прямо на нём размечают линии резекции, вычисляют длину костных сегментов и углы остеотомий. Подобный подход позволил более точно восстанавливать резецированные участки нижней челюсти, добиваться высоких функциональных и эстетических показателей, а также экономить время за счёт одновременного выполнения резекционного и реконструктивного этапов.

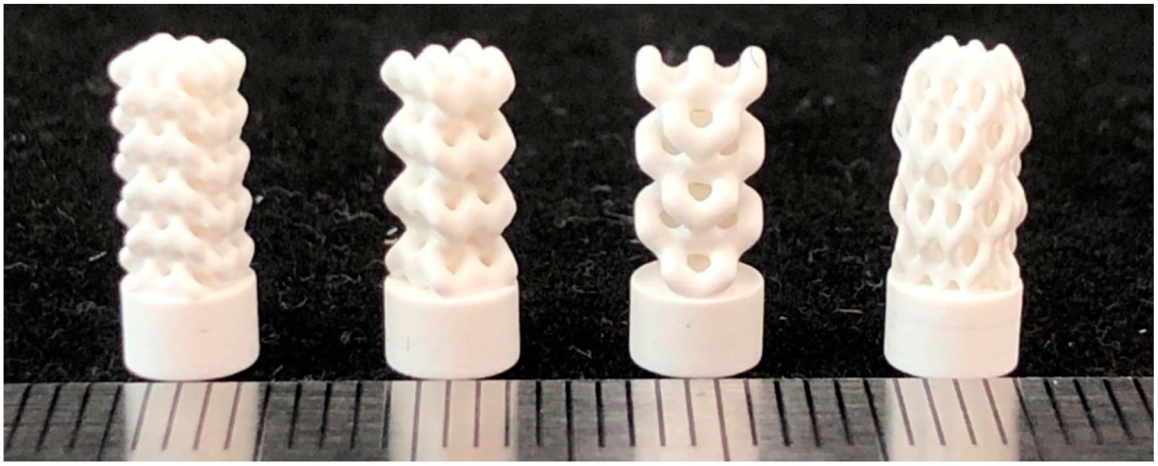


*Рис 2*. Имплантаты, напечатанные для дефектов губчатой костной ткани, изготовленные по моделям

Дальнейшим развитием методики становится не просто печать пластиковой копии, а изготовление финишного имплантата из биодеградируемого полимера, способного постепенно замещаться собственной костной тканью. Контактная базальная поверхность такого имплантата составляет до 98 % площади костного изъяна, что обеспечивает прецизионную посадку и стабильность без дополнительных металлических фиксаторов [45].

Полимолочная кислота (PLA) отличается прекрасной биосовместимостью, медленной и нетоксичной резорбцией в тканях, а также приемлемыми прочностными характеристиками. Внутри организма она деградирует, уступая место вновь образующейся кости. Пористая архитектура изделия не только не препятствует врастанию костного регенерата со стороны краёв, но и кратно увеличивает эффективную площадь поверхности, позволяя использовать имплантат в качестве носителя тромбоцит-обогащённой плазмы, ростовых факторов или стволовых клеток, наносимых как снаружи, так и в глубину ячеистой структуры [5].

Технология 3D-биопечати, тесно переплетающаяся с трёхмерным моделированием, активно развивается и в области тканевой инженерии. Blender используют для проектирования комбинированных скаффолдов из полилактида и альгината натрия. PLA формирует механический остов, способный выдерживать нагрузки, близкие к таковым в интактном суставном хряще, а гидрогель на основе альгината создаёт микроокружение, поддерживающее жизнеспособность мезенхимальных стромальных клеток и хондроцитов. На начальном этапе отлаживают печать каждым материалом по отдельности: для PLA варьируют ретракцию, скорость и процент инфилла, для альгината натрия применяют печать в поддерживающей суспензии из агарозы с последующей сшивкой в хлориде кальция [6**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Blender открывает возможности не только статического, но и динамического моделирования. Анимация построена на ключевых кадрах: средствами Python API можно программно варьировать практически любой атрибут объекта во времени. Для этого нужному параметру присваивают

значение и фиксируют его на конкретном кадре. Интерполяция между ключевыми позициями по умолчанию происходит по сплайну Безье, но может быть переопределена в линейную или ступенчатую [2].

Таким образом, Blender может рассматриваться как полноценный и финансово оправданный инструмент для проектирования костных имплантатов, адаптированных под конкретного больного. Отсутствие лицензионных отчислений делает его идеальным выбором для малобюджетных проектов, особенно на старте исследований. Сочетание же аддитивных технологий с CAS-системами позволяет кратно повысить эффективность хирургической помощи благодаря научно обоснованному учёту индивидуальных анатомических особенностей, рациональной организации операции и минимальной травматизации тканей.

## Библиографический список


1. Карпов О.Э., Гаврюшин С.С., Замятин М.Н., Епифанов С.А., Хрыков С.С. Цифровые технологии в современной реконструктивной хирургии // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. – 2016. – Т. 11, № 2. – С. 3–8.
2. Филиппов С.В. Программная платформа Blender как среда моделирования объектов и процессов естественно-научных дисциплин. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. – Препринт № 230. – 42 с.
3. Клыков А.И., Фролова Н.А. Моделирование участка микроциркуляторного русла в 3D-редакторе Blender 2.49b. – Смоленск: Смоленская государственная медицинская академия, 2010.
4. Диков Ю.Ю., Соболевский В.А., Кропотов М.А., Ивашков В.Ю. Применение трехмерного моделирования и 3D-печати при реконструкции нижней челюсти // Опухоли головы и шеи. – 2015. – № 1. – С. 22–26.
5. Смирнов С.С., Черваев А.А., Карпов А.А., Сущевских М.В., Чэ Ш., Стенина К.А., Лебедева Л.С., Тельнова А.Ю., Терещенко И.Б., Платон Р.М., Платон С.М., Красавин С.С., Ахметова А.А., Харисов Р.А., Николаев И.К., Вебер Е.В., Ивкин Д.Ю., Галагудза М.М. Замещение костного дефекта черепа биоразлагаемым полимерным имплантом с использованием аддитивных технологий // Вестник Санкт-Петербургского университета. Медицина. – 2025. – Т. 20, вып. 1. – С. 81–95.
6. Мачулин С.А., Астрелина Т.А., Усупжанова Д.Ю., Завьялов А.О., Маливанова Т.Ф., Головкова А.И., Кобзева И.В., Сучкова Ю.Б., Брунчуков В.А., Расторгуева А.А., Никитина В.А., Ломоносова Е.Е., Михадаркина О.Г., Самойлов А.С. Создание методом 3D-печати тканеинженерной конструкции, предназначенной для замещения дефектов хрящевой ткани // Биомедицина. – 2023. – Т. 19, № 3Е. – С. 52–58.


© Султанмуратова А.Р.,2026

УДК 617.7-073.178

И.Р. СУЛТАНОВА
*Ilvilvilv16@mail.ru*
Науч. руковод. – к.т.н., доцент кафедры БМИ Л.Р. САЯПОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ТОНОМЕТРАХ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ

*Аннотация.* В данной статье рассматриваются особенности применения микроконтроллеров в тонометрах внутриглазного давления. Описаны основные принципы измерения внутриглазного давления, а также этапы преобразования и обработки сигнала в современных медицинских приборах [2, 7].

*Ключевые слова:* внутриглазное давление, тонометр, микроконтроллер, обработка сигналов, медицинская техника, аналого-цифровой преобразователь.

## Введение

Современная медицинская техника активно использует цифровые технологии для повышения точности и надёжности диагностики. Одним из ключевых направлений является разработка приборов для измерения внутриглазного давления, которое является важным параметром при выявлении офтальмологических заболеваний, в частности глаукомы [2].

С развитием микроэлектроники значительная часть функций таких устройств была перенесена на микроконтроллеры. Это позволило повысить точность измерений, снизить энергопотребление и обеспечить компактность приборов [7].

## Принципы измерения внутриглазного давления

Измерение внутриглазного давления может осуществляться различными методами, включая аппланационный, импрессионный и бесконтактный. Независимо от метода, измерительный процесс сводится к регистрации реакции глаза на внешнее воздействие [2].

В результате воздействия формируется сигнал, который характеризует механические свойства глазных тканей. Этот сигнал преобразуется в электрическую форму с помощью датчиков, после чего подвергается обработке [7].

Поскольку исходный сигнал имеет низкий уровень и подвержен шумам, требуется его усиление и фильтрация. Для этого применяются операционные усилители и аналоговые фильтры [3, 8]. Далее сигнал преобразуется в цифровую форму и анализируется.

## Роль микроконтроллера в медицинских измерительных системах

Микроконтроллер является центральным элементом современных измерительных приборов. Он объединяет функции сбора данных, их обработки и управления системой [4].

Основными задачами микроконтроллера являются:

- приём данных от датчиков через аналого-цифровые преобразователи;
- выполнение математической обработки сигналов;
- вычисление измеряемых параметров;
- управление периферийными устройствами.

Благодаря встроенным периферийным модулям микроконтроллеры способны выполнять эти задачи с высокой скоростью и минимальными затратами энергии [6].

## Обработка сигналов в микроконтроллере

Обработка сигналов включает несколько этапов. На первом этапе происходит оцифровка аналогового сигнала с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя [4]. Далее выполняется фильтрация, направленная на устранение шумов и помех [1].

Следующим этапом является анализ сигнала, который может включать определение максимального значения и других параметров сигнала. На основе полученных данных вычисляется значение внутриглазного давления с использованием калибровочных зависимостей [7].

## Архитектурные особенности микроконтроллеров

Современные микроконтроллеры, применяемые в медицинской технике, обладают рядом особенностей, таких как наличие встроенных периферийных модулей, низкое энергопотребление и высокая надёжность [4].

Многие микроконтроллеры построены на архитектуре RISC, что обеспечивает высокую производительность при выполнении операций обработки данных [9].

## Интерфейсы и взаимодействие с внешними устройствами

Микроконтроллер обеспечивает взаимодействие с различными внешними устройствами, такими как дисплеи, память и компьютеры. Для этого используются стандартные интерфейсы передачи данных.

Наиболее распространёнными являются последовательные интерфейсы, обеспечивающие обмен данными с периферийными устройствами и внешними системами.

### Преимущества применения микроконтроллеров

Использование микроконтроллеров в тонометрах внутриглазного давления позволяет добиться повышения точности измерений, уменьшения размеров устройства и снижения энергопотребления [6].

Кроме того, программная реализация алгоритмов обеспечивает гибкость и возможность модернизации устройств без изменения аппаратной части.

### Заключение

Применение микроконтроллеров в тонометрах внутриглазного давления является важным этапом развития медицинской техники. Они обеспечивают высокую точность измерений, надёжность работы и удобство эксплуатации приборов [7].

Современные тенденции направлены на дальнейшее развитие цифровых методов обработки сигналов и повышение функциональности медицинских устройств.

### Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка сигналов. — М.: Техносфера, 2012.

2. Кулагин В. П., Лапшин А. В. Медицинские приборы и системы. — М.: Академия, 2015.

3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. — М.: ДМК Пресс, 2018.

4. Datasheet ATmega168V-20AU. Microchip Technology Inc.

5. Datasheet MCP601 Operational Amplifier. Microchip Technology Inc.

6. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. — Cambridge University Press, 2015.

7. Webster J. G. Medical Instrumentation: Application and Design. — Wiley, 2014.

8. Franco S. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. — McGraw-Hill, 2015.

9. Sedra A., Smith K. Microelectronic Circuits. — Oxford University Press, 2016.

© Султанова И.Р., 2026

УДК 615.47:616

О.П. ФРОЛОВА
bly2004bly2004@gmail.com
Науч. руковод. – ст. преподаватель кафедры биомедицинской инженерии Н.С. ИВАНОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ АППАРАТА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АПНОЭ СНА

*Аннотация.* В статье рассматривается проблема синдрома обструктивного апноэ сна (СОАС) как значимого фактора риска развития сердечно-сосудистых, неврологических и метаболических расстройств. Анализируются патогенетические механизмы взаимосвязи СОАС с артериальной гипертензией, цереброваскулярными заболеваниями и когнитивной дисфункцией.

*Ключевые слова:* синдром обструктивного апноэ сна, регистрация апноэ, гипоксия, полисомнография, принципиальная схема, диагностическое устройство.

Знакомая многим ситуация: человек громко храпит ночью, а утром чувствует себя разбитым. Часто за этим стоит синдром обструктивного апноэ сна (СОАС) — состояние, при котором во сне многократно перекрываются дыхательные пути, и дыхание останавливается на несколько секунд или даже минут [1]. Это не просто помеха для окружающих. СОАС повышает риск гипертонии, инфарктов, инсультов и проблем с памятью [2]. В России, где сердечно-сосудистые заболевания остаются одной из главных угроз здоровью, вовремя распознать апноэ особенно важно.

По данным российских учёных, среди людей старше 30 лет СОАС встречается у 15–20% [3]. Однако многие не подозревают о своём диагнозе, да и врачи не всегда обращают на это внимание. Самый точный метод диагностики — полисомнография (ПСГ), но она дорогая и проводится только в специальных центрах. Как сообщает Общероссийский народный фронт (2024), нужным оборудованием оснащены лишь 25% региональных больниц, а очереди на исследование растягиваются на 3–9 месяцев [4]. В итоге болезнь выявляют поздно, когда уже развились осложнения.

Особенно остро вопрос встал после пандемии COVID-19. Постковидный синдром нередко ухудшает качество сна и обостряет скрытое апноэ. Исследование НМИЦ терапии и профилактической медицины (2024) показало: у 40% переболевших коронавирусом в средней или тяжёлой форме параметры дыхания во сне ухудшились, а жалобы на дневную усталость и «туман в голове» участились [5].

Почему апноэ так опасно для сердца и мозга? Повторяющиеся остановки дыхания вызывают перепады уровня кислорода в крови, перевозбуждают симпатическую нервную систему и запускают воспаление. По данным Научного центра неврологии, у людей с тяжёлым нелеченным апноэ риск инсульта в 3–4 раза выше, чем в среднем по популяции [6]. Кроме того, ночная гипоксия повреждает клетки мозга, приближая нейродегенеративные изменения. Сотрудники РНИМУ им. Н.И. Пирогова выяснили, что 35% пациентов с СОАС имеют выраженные нарушения вербальной памяти и способности планировать свои действия [7].

В связи с вышеизложенным, нужны простые и доступные приборы, которые позволят выявлять апноэ на ранних этапах — прямо в домашних условиях или на приёме у терапевта. Такие устройства помогут провести массовый скрининг среди групп риска и своевременно направить людей к сомнологу.

Один из вариантов такого прибора представлен на рисунке 1. Разработанная принципиальная схема объединяет несколько датчиков и доступную элементную базу.

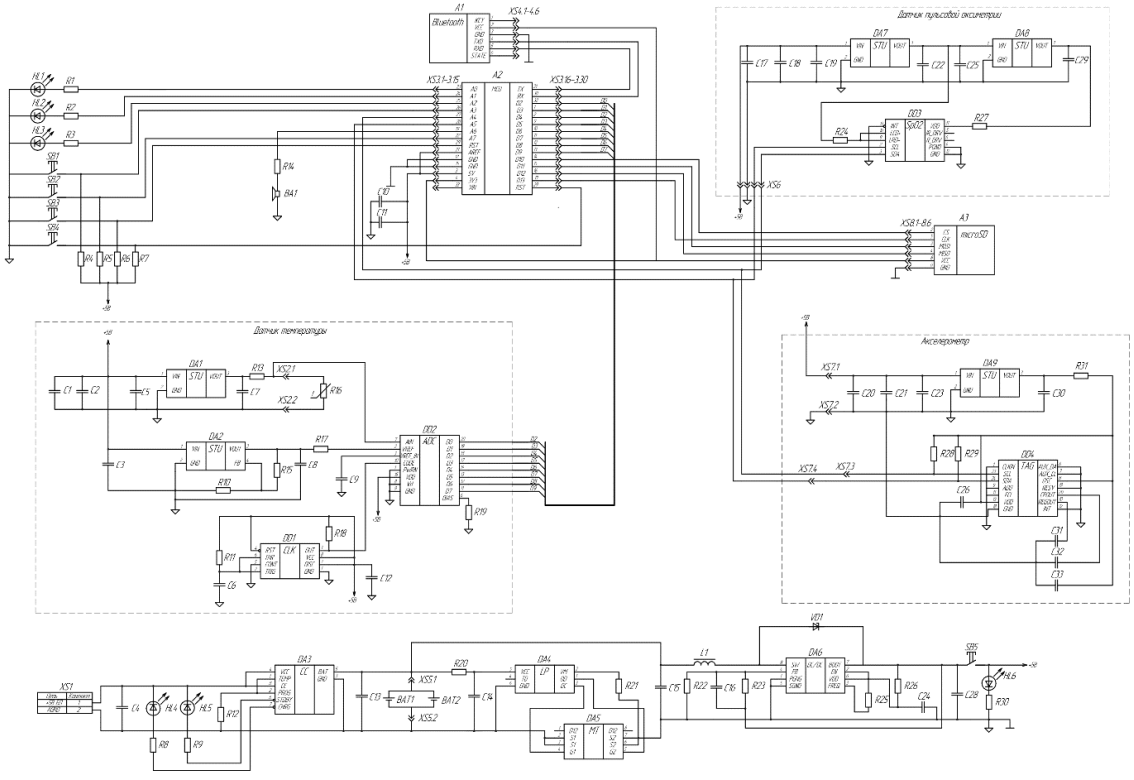


*Рис. 1.* Принципиальная схема устройства для регистрации апноэ сна

Прибор работает следующим образом: сердце прибора - платформа Arduino Nano (микросхема А2) на базе контроллера Atmega 328P. К ней через разъёмы XS3.1-3.15 и XS3.16-3.30 (тип PPTC151LFBNRC) подключаются все датчики и управляющие элементы.

Устройством управляют кнопки SB1-SB4 (модель KLS7-TS6601). Три светодиода (GNL-0805) сигнализируют о состояниях: HL1 (зелёный) - нормальная работа, идёт мониторинг, HL2 (жёлтый) - зафиксировано апноэ, HL3 (красный) - неисправность: села батарея, отвалился контакт с датчиком пульсоксиметра, ошибка чтения SD-карты или сбой одного из сенсоров.

При наступлении апноэ срабатывает пьезоизлучатель BA1 (HPA17A) - подаётся звуковой сигнал. Микросхема A3 - модуль для microSD. На карту памяти записываются показания датчика температуры, пульсоксиметра и акселерометра. Эти данные потом можно скопировать на компьютер. А для беспроводной передачи на больничный ПК служит модуль ESP8266-01 (A1) - он организует Bluetooth-соединение.

Для начала разберем датчик пульсоксиметрии. Здесь используются два стабилизатора напряжения: DA7 (TPS71533) снижает 5 В до 3,3 В, DA8 (TPS71518) — с 3,3 В до 1,8 В. Питание подаётся на микросхему MAX30100 (DD3) — это и есть датчик пульсовой оксиметрии. Подключение через разъём XS6 Molex 15-91-3044.

Далее рассмотрим наполнение акселерометра. Стабилизатор DA9 (TPS71533) подаёт нужное напряжение на микросхему MPU6050 (DD4). Подключение — через разъём XS8.1–8.6 Molex 15-91-3044. Акселерометр позволяет регистрировать движения грудной клетки и положения тела во сне.

Следующий датчик – датчик температуры, этот блок уже посложнее. В него входят: два регулятора DA1 (TPS71533) и DA2 (TPS71501), таймер NE555 (DD1), АЦП AD9057BRSZ-80 (DD2) и терморезистор R16 B57861S0502F045. Терморезистор подключается через разъём XS2.1-2.2 TE 292173-2. Регуляторы обеспечивают питание терморезистора и опорное напряжение для АЦП. АЦП превращает аналоговый сигнал от терморезистора в цифровой код, который затем считывает микроконтроллер.

Зарядка устройства идет от внешнего блока 5 В, 1 А через разъём microUSB XS1 (473460001). Светодиоды HL4 и HL5 показывают: первый горит, когда идёт зарядка, второй - когда аккумуляторы полностью заряжены. За процесс зарядки отвечает плата TP4056 (DA3).

Сами аккумуляторы - две батареи Panasonic NCR18650B (BAT1, BAT2), подключаемые через разъём XS5 Molex 436500224. Чтобы защитить их от перезаряда и глубокого разряда, поставлена плата DW01A (DA4) и МОП-транзистор FS8205A (DA5). Напряжение аккумуляторов (около 3,7 В) недостаточно для работы схемы, поэтому использован повышающий DC-DC преобразователь LM2621MM (DA6.1-6.2) - он поднимает напряжение до 5 В. Включается прибор кнопкой SB5 (ES02MCBE), а светодиод HL6 горит, когда питание подано.

## Библиографический список

1. Вейн, А.М. Сон и дыхание / А.М. Вейн, Я.И. Левин. – Москва: Эйдос Медиа, 2019. – 318 с.

2. Пальман, А.Д. Сомнология и респираторная медицина / А.Д. Пальман. – Санкт-Петербург : СпецЛит, 2020. – 256 с.
3. [Электронный ресурс]: Данные эпидемиологического исследования распространенности СОАС в РФ. «Кардиоваскулярная терапия и профилактика». – 2022. https://scardio.ru
4. [Электронный ресурс]: Отчет ОНФ «О доступности высокотехнологичной медицинской помощи в регионах РФ». – 2024. https://onf.ru
5. [Электронный ресурс]: Исследование НМИЦ ТПМ «Постковидные нарушения сна». – 2024. https://gnicpm.ru
6. [Электронный ресурс]: Исследования НЦН о связи СОАС и инсульта. «Неврологический журнал». – 2023. https://www.neurology.ru
7. [Электронный ресурс]: Данные РНИМУ им. Н.И. Пирогова о когнитивных нарушениях при СОАС. – 2024. https://rsmu.ru
8. Коровкин, Ю.Г. Нейрокогнитивные нарушения в сомнологии / Ю.Г. Коровкин. – Москва: Академический проект, 2019. – 274 с.

© Фролова О.П., 2026

УДК 615.47

Р.А. ХАКИМОВА
*renatahakimova062@mail.ru*
Науч. руковод. – ассистент каф. БМИ К.Р. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛАСТИЧНОСТИ КОЖИ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА CUTOMETER MPA 580: ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

*Аннотация.* В данной статье был рассмотрен метод количественной оценки биомеханических свойств кожи in vivo с использованием прибора Cutometer MPA 580 (Courage + Khazaka electronic GmbH, Германия). Также были описаны принцип работы устройства, оптическая схема регистрации деформации, метрологическое обеспечение прибора и его технические характеристики.

*Ключевые слова:* кожа; эластичность; прибор для определения эластичности; метод всасывания; кутометрия;

Кожа человека – это сложный орган, выполняющий множество функций. Её биомеханические характеристики важны не только для защиты организма, но и служат наглядным показателем того, как мы стареем, насколько мы здоровы и не страдаем ли от каких-либо заболеваний [4].

Эластичность относится к числу базовых параметров оценки состояния кожного покрова. Данное понятие характеризует способность кожи противостоять деформации и восстанавливать свою исходную форму после устранения внешнего механического воздействия на измеряемую область [1].

На сегодняшний день разработаны различные методы количественной оценки эластичности кожи, которые классифицируются по типу прикладываемой деформации. Методы продольной деформации включают тензометрический (метод растяжения), при котором исследуемый участок кожи фиксируется с помощью зажимов, а электромеханический привод осуществляет контролируемое растяжение с регистрацией силы сопротивления, а также торсиометрический (метод скручивания), основанный на приложении крутящего момента с увеличением угла от 5 до 30 градусов. К методам поперечной деформации относятся баллистометрия и кутометрия, которые получили наиболее широкое распространение в клинической практике и косметологических исследования [3].

В основе измерений Cutometer MPA 580 лежит разрежение, которое создается внутри измерительной насадки, плотно контактирующей с кожей. Сам датчик устроен как полый цилиндр, где смонтированы вакуумная система и оптический блок [2]. На рисунке 1 представлен внешний вид описываемого устройства.




*Рис. 10.* Внешний вид прибора Cutometer MPA 580

Оптический блок устройства включает источник света, пару призм, направляющих луч, и принимающий сигнал фотодетектор. Как только включается вакуум, участок кожи втягивается в полость трубки, а оптика бесконтактно отслеживает глубину этого подъема в реальном времени. Так регистрируют деформацию тканей под действием постоянного перепада давления, затем давление сбрасывают и фиксируют, насколько и как быстро кожа возвращается обратно. В результате строится временная кривая, по форме которой судят и об упругом, и о вязком компонентах механического поведения кожи [2]. На рисунке 2 представлен пример кривой втягивания кожи.

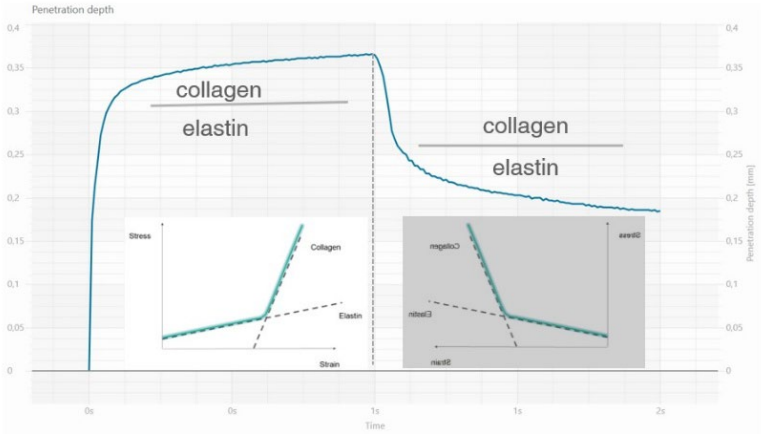



Рис. 2. Кривая втягивания кожи

Типичная форма кривой втягивания кожи (см. рис. 2) объясняется различным соотношением эластина и коллагена в тканях. Эластин отвечает за упругость кожи, в то время как основная задача коллагена – сохранять форму кожи, противодействуя деформации.

Начальный крутой участок кривой формируется за счёт эластина, поскольку эти волокна легко смещаются и обладают высокой эластичностью. По мере того, как кожа проваливается внутрь зонда, в действие вступает коллаген: он прочнее и лучше сопротивляется механическому воздействию, благодаря чему рост кривой замедляется. Сразу после прекращения действия отрицательного давления коллаген начинает возвращать коже её первоначальную форму [2].

Анализатор MPA 580 представляет собой мультипараметрическую систему, которая, помимо измерения эластичности, способна измерять и другие параметры кожи, такие как: значение pH, температуры, содержания кожного сала, гидратации рогового слоя, уровня пигментации и эритермы [5]. Основные технические характеристики анализатора, включая диапазоны и погрешности измерений по каждому из каналов, приведены в таблице 1.

*Таблица 2*

Основные технические характеристики Cutometer MPA 580

| Наименование характеристик | Значения характеристик |
|---|---|
| Диапазон измерений относительной влажности воздуха над поверхностью кожи, % | 5 – 95 |
| Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений относительной влажности (от 5 до 30 % вкл.) | ±2,5 |
| Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений относительной влажности (св. 30 до 90 % вкл.) | ±1,5 |
| Предел допускаемой абсолютной погрешности | ±2,5 |

| | |
|---|---|
| измерений относительной влажности (св. 90 до 95 % вкл.) | |
| Диапазон измерений температуры, °С | 20 – 40 |
| Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры, °С | ±0,5 |
| Диапазон измерений pH | 0 – 12 |
| Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений pH | ±0,1 |
| Диапазон показаний жирности (массовой доли кожного сала), мг/м² | 0,5 – 3,5 |
| Диапазон показаний увлажненности кожи, усл. ед. | 10 – 130 |
| Диапазон показаний уровня меланина/эритермы, усл. ед. | 50 – 999 |
| Входное напряжение, В | 100/240 |
| Частота, Гц | 50/60 |
| Габаритные размеры, мм | 260×255×70 |
| Масса, кг, не более | 3,3 |

Приведённые в таблице 1 диапазоны измерений и пределы погрешностей подтверждаются при регулярной поверке прибора. Периодичность поверки составляет один год. Процедура выполняется с использованием электронных весов специального класса точности, гигрометра и образцовых буферных растворов. Поверка должна проводиться при температуре от 15 до 30°С и относительной влажности от 30 до 70% [5].

Таким образом, анализатор MPA 580 представляет собой технически сложное средство измерения, для которого регламентированы не только рабочие характеристики, но и условия эксплуатации, а также процедура периодического контроля точности.

**Заключение.** В результате проведенной работы был разобран принцип эластометрии кожи на примере функционирования Cutometer MPA 580, а также перечислены основные характеристики прибора и описана процедура поверки. Полученные данные могут быть использованы при планировании биомедицинских исследований, связанных с оценкой механических свойств кожи.

## Библиографический список

1. Путинцева П. А., Конышева Е. Д., Мильчаков Д. Е. Способы восстановления эластичности кожи и их эффективность (на примере некоторых современных методов) // МНИЖ. 2015. №3-4 (34). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-vosstanovleniya-elastichnosti-kozhi-i-ih-effektivnost-na-primere-nekotoryh-sovremennyh-metodov (дата обращения: 01.05.2026).

2. Cutometer® MPA 580 - Skin Elasticity Measurement. – URL: https://www.courage-khazaka.com/en/scientific-products/cutometer-dual-mpa-580 (дата обращения: 03.05.2026).
3. Хакимова, Р. А. Методы и устройства для определения эластичности кожи / Р. А. Хакимова, К. Р. Уразбахтина // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2025 : Сборник трудов XXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 03–05 декабря 2025 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2025. – С. 298-303. – EDN FEKZBG (дата обращения: 01.05.2026).
4. Хакимова, Р. А. Устройство для определения эластичности кожи / Р. А. Хакимова // Мавлютовские чтения : Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года. Том 3. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 253-256. – EDN TIPCWE (дата обращения: 03.05.2026).
5. 41826-09: MPA 580 Анализатор - Производители, поставщики и поверители – URL: https://all-pribors.ru/opisanie/41826-09-mpa-580?ysclid=mor2ec7udn675671657 (дата обращения: 03.05.2026).

© Хакимова Р.А., 2026

УДК 616.314-77

Д.И. ХУЗИН
*khuzindanis27@gmail.ru*
Науч. руковод. – Директор Института электротехнического инжиниринга, доцент кафедры биомедицинской инженерии Ю.О. УРАЗБАХТИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## АКТУАЛЬНОСТЬ ИНТРАОРАЛЬНЫХ СКАНЕРОВ В СОВРЕМЕННОЙ СТОМАТОЛОГИИ

*Аннотация.* В статье анализируется современное состояние и перспективы использования интраоральных сканеров (IOS) в стоматологической практике. Особое внимание уделяется сравнительной точности IOS в различных клинических сценариях.

*Ключевые слова:* интраоральный сканер, цифровая стоматология, CAD/CAM, точность сканирования, цифровой слепок, искусственный интеллект, стоматологическая диагностика.

Интраоральные сканеры (IOS) представляют собой портативные оптические устройства, которые фиксируют трёхмерные изображения зубов и структур полости рта в реальном времени, исключая необходимость

использования традиционных слепочных ложек и материалов, таких как альгинат или поливинилсилоксан. С момента появления первых коммерческих устройств в рамках системы Cerec в 1980‑х годах технология прошла долгий путь развития, и сегодня IOS стали неотъемлемой частью стоматологической практики в развитых странах, а их применение продолжает активно расширяться по всему миру.

Актуальность темы обусловлена стремительным ростом рынка цифровой стоматологии, активным внедрением технологий искусственного интеллекта, повышением требований пациентов к комфорту лечения, а также необходимостью объективной оценки клинической эффективности цифровых протоколов.

Согласно аналитическим данным, мировой рынок интраоральных сканеров демонстрирует устойчивый рост. В 2025 году его объём оценивается в 635–824 млн долларов США, а к 2031 году прогнозируется достижение уровня 1 230 млн долларов при среднегодовом темпе роста (CAGR) 11,7 %. По другим оценкам, рынок может вырасти с 1,6 млрд долларов в 2024 году до 2,5 млрд долларов к 2031 году. Такая динамика обусловлена несколькими факторами:

- Ростом численности пожилого населения в Европе и Азии, что увеличивает спрос на ортопедическое лечение.
- Повышением осведомлённости о здоровье полости рта в развивающихся регионах.
- Стремлением к одномоментному протезированию (restoration in the same day) в США.
- Развитием систем CAD/CAM и 3D-печати, которые требуют цифровых оттисков высокого качества.

Лидерами рынка являются Северная Америка и Европа, на долю которых приходится около 65 % глобального рынка. Ключевые игроки – Align Technologies и Sirona – занимают более 55 % рынка. Наиболее динамично развивающимися регионами признаны Азиатско-Тихоокеанский регион, особенно Китай и Индия, где ценовая доступность и растущий спрос стимулируют внедрение технологии.

Несмотря на активный рост, существуют сдерживающие факторы: высокая стоимость оборудования, необходимость обучения персонала, отсутствие стандартизации между различными моделями сканеров и программными платформами, а также проблемы совместимости с существующими рабочими процессами.

В основе большинства современных интраоральных сканеров лежит принцип конфокальной микроскопии, часто в сочетании с технологией структурированного света или распознаванием эффекта Муаре. Сканер проецирует на поверхность зуба серию изображений на различной глубине, после чего программное обеспечение реконструирует трёхмерную модель. Некоторые системы используют технологию аккордеонной fringe-интерферометрии (AFI), что позволяет добиться высокой детализации даже на сложных поверхностях.

По данным 2025 года, лучшие интраоральные сканеры достигают точности в диапазоне 5–30 микрометров (мкм) при сканировании всей дуги в соответствии со стандартами ISO и клиническими исследованиями. При этом точность остаётся главным требованием для стоматологов, использующих IOS. Отклонения в 5–20 мкм при сканировании всей дуги обеспечивают оптимальную посадку реставраций, имплантатов и ортодонтических аппаратов.

В обзорном исследовании (umbrella review, 2025) были проанализированы данные 10 систематических обзоров, опубликованных в 2020–2024 годах, охватывающих более 30 моделей IOS. Согласно полученным результатам, TRIOS 3 (3Shape) и Primescan (Dentsply Sirona) неизменно показывают наивысшую точность при сканировании полной дуги.

Ключевые выводы систематических обзоров:

- IOS обеспечивают высокую точность для одиночных реставраций и квадрантных задач.

- Точность при частичной адентии и полностью беззубых дугах остаётся ограничивающим фактором.

- По сравнению с традиционными оттисками IOS в целом сокращают процедурное время (IAT) и повышают комфорт пациента.

- В полнодуговых имплантологических случаях цифровые оттиски демонстрируют статистически значимое большее трёхмерное отклонение по сравнению с традиционными, однако этот результат сопровождается очень высокой гетерогенностью исследований.

- Мета-анализ 2024 года показал, что, хотя данные о точности неоднозначны, клиническая пригодность протезов, полученных по цифровым оттискам, находится в пределах клинически приемлемых порогов.

Интраоральное сканирование является золотым стандартом для получения цифровых слепков при протезировании. Технология позволяет изготавливать коронки, мостовидные протезы, виниры и вкладки с высокой прецизионностью. Современные IOS особенно эффективны для пост- и корневых реставраций, где требуется точное воспроизведение канальной системы.

В имплантологии интраоральные сканеры активно используются для создания цифровых моделей при планировании операции и изготовлении хирургических шаблонов. Хирурги-имплантологи совмещают компьютерную томограмму (КЛКТ) и результаты интраорального сканирования челюстей, что позволяет подойти персонализированно к каждому конкретному случаю. Современные возможности навигационной хирургии, позволяющей отслеживать положение инструментов в процессе манипуляций, повышают скорость установки имплантов и сокращают реабилитационный период.

В ортодонтии IOS стали незаменимым инструментом для планирования лечения, мониторинга перемещения зубов и изготовления элайнеров. Исследование 2025 года, сравнивавшее точность трех устройств — Trios®, Panda® и E3® — на 25 добровольцах, показало, что все три системы

демонстрируют сопоставимую адекватную точность и надёжность для ортодонтических измерений.

Недавние исследования расширили понимание диагностической эффективности IOS. Интраоральные сканеры с флуоресцентной технологией успешно применяются для выявления кариеса: 87 % участников исследования сочли процедуру сканирования комфортной и приемлемой. При этом система показала хорошее согласие между разными операторами ($\kappa = 0{,}744$), что делает её надёжным диагностическим инструментом.

Одним из наиболее значимых преимуществ интраорального сканирования является повышение комфорта пациента. Цифровые оттиски устраняют необходимость использования рвотных материалов, сокращают процедурное время и обеспечивают мгновенную визуализацию результатов, что особенно важно для пациентов с дентофобией (страхом стоматологического лечения).

Исследование, оценивавшее принятие пациентами интраорального сканирования с флуоресцентной технологией, подтвердило высокую степень удовлетворённости: большинство участников оценили процедуру как комфортную. Отмечено, что наиболее дискомфортной зоной оказались дистальные поверхности верхних моляров（$p < 0{,}001$）.

Мета-анализ 2026 года, обобщающий данные по времени эффективности и комфорту пациентов, подтвердил, что цифровые оттиски значительно превосходят традиционные методы по показателям комфорта и снижения тревожности, а также биологически так же безопасны, как и традиционные методы.

Особенно важным является применение IOS у детей. Рандомизированное кросс-овер исследование 2025 года, оценивавшее комфорт двух широко используемых устройств – Itero™ и 3Shape™ - у пациентов детского возраста, показало, что дети в целом удовлетворены процедурой. Факторы, повышающие комфорт: меньший размер внутриротовой камеры, более тихая работа и большие дисплеи.

Интраоральные сканеры являются краеугольным камнем концепции полностью цифрового рабочего процесса (fully digital workflow). Они интегрируются с системами CAD/CAM, 3D-принтерами и фрезерными станками, позволяя изготавливать реставрации «в тот же день» без участия зуботехнической лаборатории. Ожидается, что к 2032 году рынок стоматологических CAD/CAM достигнет 4,61 млрд долларов, что свидетельствует о масштабной цифровизации отрасли.

Искусственный интеллект (ИИ) становится неотъемлемой частью современных IOS. В 2025 году ведущие производители активно внедряют ИИ-решения:

- 3Shape TRIOS 6 с ПО Dx Plus использует искусственный интеллект для предоставления объективной, точной, последовательной обратной связи, выступая как «второе мнение» по данным интраоральных сканов.

- SHINING 3D Dental запустила Aoralscan Elf с ИИ-функциями, включая инструмент оптимизации окклюзии IntelliBite и интеллектуальный набор для управления налётом, что обеспечивает более высокую точность и эффективность лечения.

- Pearl и Medit объединили усилия для интеграции ИИ-диагностики в платформу Medit Link, что позволяет стоматологам диагностировать состояния с большей точностью и эффективно коммуницировать с пациентами.

ИИ-приложения в IOS включают автоматическую очистку сканов, помощь в сканировании, автоматическое выравнивание имплантологического сканирующего тела с соответствующим CAD-объектом, а также автоматическое совмещение лицевых и интраоральных сканов.

Развитие беспроводных IOS и облачных вычислений открывает новые возможности. Время сканирования в некоторых современных системах составляет менее 30 секунд при точности, конкурирующей с лабораторными моделями. Облачные платформы позволяют мгновенно передавать данные в лабораторию, сокращая время ожидания и минимизируя ошибки.

Несмотря на очевидные преимущества, существуют клинические сценарии, где IOS пока уступают традиционным методам:

1. Сложность при полной адентии: Точность IOS при сканировании беззубых челюстей остаётся невысокой по сравнению с традиционными оттисками.

2. Влияние поддесневых структур: Глубокие поддесневые границы препарирования остаются сложными для оптического захвата.

3. Обучаемость и стоимость: Начальные инвестиции в оборудование и обучение персонала могут быть значительными, особенно для малых клиник.

4. Отсутствие стандартизации: Разнообразие протоколов сканирования и отсутствие унифицированных метрик точности затрудняют сравнение результатов между исследованиями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интраоральные сканеры являются одним из наиболее значимых технологических прорывов в стоматологии последних десятилетий. В 2025 году их актуальность определяется совокупностью факторов:

- Экономическая целесообразность: Рынок стремительно растёт с CAGR 9–12 %, что отражает высокий спрос на цифровые решения.

- Клиническая эффективность: Доказанная мета-анализами точность на уровне 5–30 мкм делает IOS приемлемыми для большинства клинических задач.

- Пациенто-ориентированность: Высокий уровень комфорта, отсутствие рвотного рефлекса, мгновенная визуализация способствуют удовлетворённости пациентов.

- Технологическая эволюция: Интеграция искусственного интеллекта, развитие беспроводных систем и облачных платформ открывают новые горизонты для персонализированной стоматологии.

Таким образом, интраоральное сканирование прочно занимает центральное место в парадигме современной цифровой стоматологии. Для дальнейшего прогресса необходима стандартизация протоколов точности, проведение более качественных клинических исследований с низким риском систематической ошибки, а также работа над удешевлением технологии для повышения доступности в развивающихся регионах.

## Библиографический список


1. Singh R, Mistry G, Kini A, et al. Accuracy and Clinical Performance of Intraoral Scanners Compared to Conventional and Extraoral Impressions: An Umbrella Review. Cureus. 2025;17(9):e93202. DOI: 10.7759/cureus.93202
2. Pesce P, et al. Accuracy of Full-Arch Intraoral Scans Versus Conventional Impression: A Systematic Review with a Meta-Analysis and a Proposal to Standardise the Analysis of the Accuracy. J Clin Med. 2024;14(1):71. DOI: 10.3390/jcm14010071
3. Dhar A. Scanning in Dentistry: A Systematic Review. J Pharm Bioallied Sci. 2024;16(Suppl 4):S3074‑S3076. DOI: 10.4103/jpbs.jpbs_1079_24
4. Dhull KS, Nagar R, Mathur P, et al. Intraoral Scanners: Mechanism, Applications, Advantages, and Limitations. J Pharm Bioallied Sci. 2024;16(Suppl 3):S1929‑S1931. DOI: 10.4103/jpbs.jpbs_1299_23
5. Юсупов Р.Д., Рубинина Э.Р., Азаряев И.В. и др. Профилактика и восстановление зубного ряда с использованием 3D-технологии в современной стоматологии. 2025. DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_30
6. Clinical study on the accuracy of wireless intraoral scanners for digital full arch impressions of dentate arches. J Dent. 2025;163:106132. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.106132
7. Cavalcanti HN, et al. Accuracy and reliability comparison between different intraoral scanning devices in patients with permanent dentition: A prospective clinical study. Int Orthod. 2025;23(2):100983. DOI: 10.1016/j.ortho.2025.100983
8. Patient acceptance, time efficiency, and inter-operator agreement in intra-oral scanning with fluorescence technology for caries detection. BMC Oral Health. 2025;25:1682. DOI: 10.1186/s12903-025-06772-y
9. Global Intra Oral Scanners Market Growth 2025‑2031. LP Information, Inc. 2025
10. Global Intraoral Scanners Market (2025‑2031): Trends, Outlook & Forecast. 6Wresearch. 2025
11. Patients' perspective on the inclusion of intraoral scanners in routine oral examination: A clinical perception study. Quintessence Publishing. 2025

12. Evaluation of intraoral scanners for comfort in pediatric patients: A randomized crossover study. J Clin Pediatr Dent. 2025
13. Meta-analysis of intraoral scanner evidence (Japanese). J Stage. 2026
14. Ma J, Zhang B, Song H, Wu D, Song T. Accuracy of digital implant impressions obtained using intraoral scanners: a systematic review and meta-analysis of in vivo studies. Int J Implant Dent. 2023;9(1):48
15. Mangano A, Beretta M, Luongo G, Mangano C, Mangano F. Conventional vs digital impressions: Acceptability, treatment comfort and stress among young orthodontic patients. Open Dent J. 2018;12:118–24
16. Pearl Partners with Medit to Enhance AI-Powered Dental Diagnostics. Pearl Press Release. 2025
17. SHINING 3D Dental launches Aoralscan Elf intra-oral scanner with AI-driven features. Dental Tribune. 2025
18. 3Shape TRIOS 6 and Dx Plus – AI in intraoral scanning. 3Shape Blog. 2025

© Хузин Д. И., 2026

УДК 615.47

А.Ю. ЦИБРИН
*tsibrinAYU@uust.ru*
Науч. руководов. – ст. преподаватель А.И. МЕЗЕНЦЕВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРОТЕЗАМИ: ПРИНЦИПЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*Аннотация*. Биоэлектрическое протезирование в настоящее время является одним из методов восстановления утраченных функций конечностей у людей с ампутациями и основывается на регистрации и интерпретации биоэлектрических сигналов организма. Метод позволяет обеспечивать естественное и функциональное управление протезом за счёт преобразования этих сигналов в команды для сервоприводов.

*Ключевые слова*: биоэлектрические протезы; метод управления протезами, обработка сигналов, система управления.

Биоэлектрические протезы представляют собой высокотехнологичные устройства для восстановления функций конечностей у людей с ампутациями. В отличие от косметических или тягово-силовых аналогов, они обеспечивают естественный контроль за счёт использования биоэлектрических сигналов организма. Управление основано на регистрации и интерпретации миоэлектрических сигналов (ЭМГ), нейроэлектрических импульсов или

сигналов из коры головного мозга, что открывает новые возможности для реабилитации и социальной адаптации пациентов [1].

В современной практике выделяют три основных метода управления биоэлектрическими протезами. Электромиографический (миоэлектрический) метод использует биоэлектрическую активность мышц культи, регистрируемую поверхностными или имплантируемыми электродами. Сигнал усиливается, фильтруется и превращается в команды для сервоприводов. Это самый распространённый неинвазивный подход, обеспечивающий достаточную точность для выполнения базовых хватов при относительной доступности по стоимости. Основными недостатками метода являются зашумлённость сигнала, зависимость от положения электродов и состояния кожи, а также необходимость периодической калибровки.

Нейроэлектрический метод опирается на сигналы, снимаемые непосредственно с периферических нервов с помощью вживляемых (регенеративных или манжетных) либо накладных электродов. Ключевое преимущество этого подхода заключается в возможности не только управления протезом, но и восстановления чувствительности за счёт электростимуляции сенсорных волокон, а также в независимости от состояния мышц культи. К числу недостатков относятся инвазивность, риск повреждения нервов, техническая сложность имплантации и длительная послеоперационная реабилитация [2].

Нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ) регистрирует сигналы непосредственно из коры головного мозга через имплантированные электроды. Данный метод наиболее перспективен для пациентов с высоким уровнем ампутации или параличом конечностей, однако он сопряжён с высокими рисками: сложностью обработки слабых сигналов мозга, инвазивностью, угрозой инфекций, возможностью отторжения имплантов и исключительно высокой стоимостью, что пока ограничивает его широкое клиническое применение.

Система управления биоэлектрическим протезом включает несколько ключевых компонентов. Датчики (поверхностные или имплантируемые) регистрируют биоэлектрическую активность. Блок обработки сигналов выполняет фильтрацию, усиление и оцифровку, используя алгоритмы классификации — от пороговых методов до нейронных сетей и машинного обучения. Контроллер преобразует обработанные сигналы в управляющие команды для исполнительных механизмов, в роли которых выступают сервоприводы, электромоторы или пневматические системы. Дополнительно современные протезы оснащаются системами обратной связи, такими как датчики силы, тактильные или визуальные индикаторы, что повышает точность и естественность управления [3].

Алгоритмы обработки сигналов варьируются от простой пороговой классификации и спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье (FFT) до нейронных сетей, методов опорных векторов (SVM) и

адаптивных самообучающихся систем, которые подстраиваются под индивидуальные особенности пользователя в реальном времени.

Среди современных биоэлектрических протезов наиболее известны BeBionic, i Limb Quantum и MyoFacil. BeBionic поддерживает 14 запрограммированных хватов, включая удержание ручки, набор текста и рукопожатие. i Limb Quantum предлагает 24 предустановленных и 12 программируемых хватов с возможностью синхронизации со смартфоном. MyoFacil представляет собой бюджетное базовое решение, подходящее для широкого круга пациентов.

Ключевыми ограничениями современных систем являются высокая стоимость (передовые модели достигают 2,5 млн рублей), малая ёмкость аккумулятора, обеспечивающая не более одного дня автономной работы, слабая защита от воды, из-за которой большинство протезов нельзя мочить, а также необходимость длительного обучения пользователя для эффективного управления.

Развитие технологий биоэлектрического протезирования идёт по нескольким направлениям: увеличение степеней свободы с переходом к независимому управлению каждым пальцем, внедрение методов глубокого обучения для точного распознавания намерений пользователя, создание полноценной сенсорной обратной связи (давление, температура, фактура поверхности), миниатюризация компонентов для снижения веса протеза, а также разработка доступных решений для массового внедрения.

Управление биоэлектрическими протезами представляет собой динамично развивающуюся область на стыке биомедицинской инженерии, робототехники и искусственного интеллекта. Современные методы обеспечивают высокую функциональность, однако сохраняются вызовы, связанные с доступностью, удобством использования и интеграцией сенсорной обратной связи. Дальнейшие инновации способны кардинально улучшить качество жизни людей с ампутациями, приближая возможности протезов к естественным функциям утраченных конечностей.

## Библиографический список

1. Илясов, Л. В. Технические средства поддержания и реабилитации функциональных систем организма человека (искусственные органы) / Л. В. Илясов, Н. И. Иванова. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 120 с.

2. Поляков, В. В. Биомедицинские нанотехнологии : учебное пособие / В. В. Поляков. — Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2018. — 129 с.

3. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение : учебное пособие / Ю. В. Подураев. — Москва : Машиностроение, 2006. — 256 с.

© Цибрин А.Ю., 2026

## СЕКЦИЯ 3.4 ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.396.96

Л.В. КАТАСКИН
*kataskin98@yandex.ru*
Науч. руководов. – доктор техн. наук, проф. А.Х. СУЛТАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

*Аннотация*. В работе рассмотрены основные типы преднамеренных помех, воздействующих на системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: заградительные, узкополосные, помеха в части, следящие и адаптивные. Проведен сравнительный анализ эффективности различных видов помех на системы с перестройкой частоты.

*Ключевые слова*: псевдослучайная перестройка рабочей частоты; ППРЧ; радиоэлектронное подавление; системы радиосвязи; радиоэлектронная борьба; частотное разнесение.

В современном мире системы радиосвязи находят применение во многих областях жизни, включая гражданскую, промышленную, военную и космическую сферы. При этом обеспечение устойчивости функционирования в условиях преднамеренных помех остается одним из приоритетных требований к построению надежных систем связи.

Одним из наиболее распространенных способов повышения помехозащищенности является метод псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), основанный на синхронном изменении несущей частоты передатчика и приемника в соответствии с заранее согласованным алгоритмом. Данный подход позволяет снизить вероятность успешного подавления и перехвата сигнала за счет спектрального распределения и временной непредсказуемости.

Интерес к системам с ППРЧ обусловлен их способностью обеспечивать энергетическую устойчивость, структурную скрытность и возможностью функционирования в сложной радиоэлектронной обстановке [1]. Вместе с тем развитие средств радиоэлектронной борьбы привело к появлению более совершенных методов противодействия, включая реактивные и адаптивные помехи, использующие оперативную разведку параметров сигнала и алгоритмы динамического распределения ресурсов подавления [2].

Системы ППРЧ принято подразделять на два основных типа: быстрые и медленные. Их отличие заключается в соотношении длительности информационного символа и времени пребывания на одной рабочей частоте. В системах с быстрой ППРЧ перестройка частоты происходит многократно в течение передачи одного символа, тогда как при медленной ППРЧ в рамках одного частотного интервала передается один или несколько символов [3].

Функционирование систем с ППРЧ зачастую происходит в условиях активного радиоэлектронного противодействия, что формирует типовую схему противостояния. Передатчик и приемник осуществляют синхронную перестройку рабочей частоты по псевдослучайному закону, тогда как постановщик помех может применять две стратегии: использовать средства радиотехнической разведки для обнаружения активного канала и формирования прицельного воздействия или применять универсальные методы подавления, не требующие априорного знания последовательности перестройки. Эффективность данных подходов определяется временными характеристиками системы, шириной рабочего диапазона, мощностью излучения помехи и алгоритмами обработки сигнала. Общая схема радиоэлектронного конфликта между системой связи с ППРЧ и постановщиком помех представлена на рисунке 1.

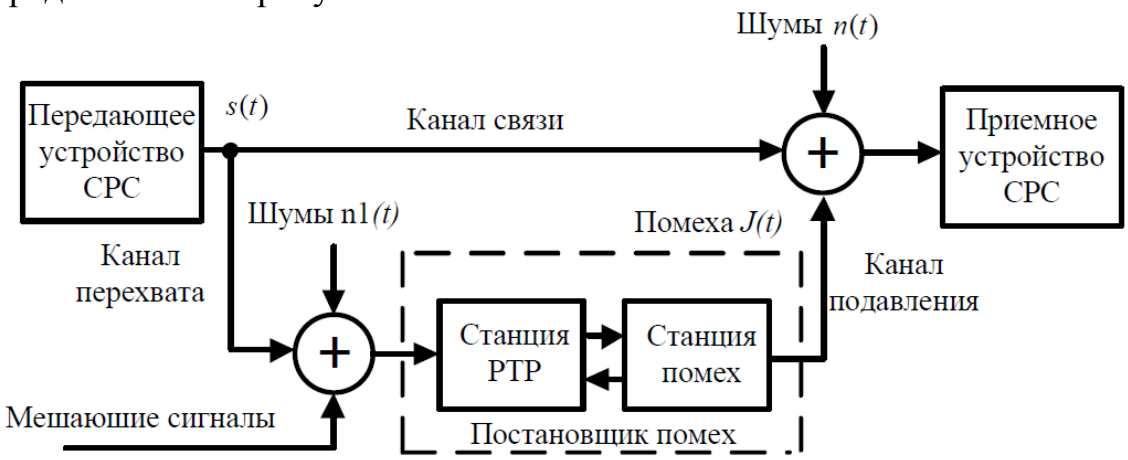



*Рис. 1* – Схема системы ППРЧ при работе с постановщиком помех [1]

Систематизация основных типов преднамеренных помех, действующих на системы радиосвязи с ППРЧ, оценка их эффективности и анализ современных подходов к повышению помехоустойчивости показывают, что наибольший практический интерес представляют активные преднамеренные помехи, формируемые благодаря целенаправленному излучению. Их классификация проводится по следующим признакам: по ширине поражаемой полосы, по степени временной согласованности с перестройкой частоты и по принципу формирования сигнала. В зависимости от выбранной стратегии спектрального распределения мощности выделяют основные типы воздействия, описание которых приводится ниже.

Заградительная (широкополосная) помеха формируется путем равномерного распределения мощности по всему диапазону перестройки

частоты или его значительной части. Преимуществом данного подхода является универсальность, поскольку для его реализации не требуется знание закона перестройки частоты. Однако при фиксированной мощности спектральная плотность помехи уменьшается, что ограничивает эффективность подавления.

Узкополосная помеха воздействует только на одну рабочую частоту или ограниченный участок спектра. Наибольшая результативность достигается при медленной ППРЧ или при наличии точной информации о текущем канале связи [1]. В условиях быстрого перемещения по частотам и широкого рабочего диапазона вероятность долговременного совпадения полезного сигнала с такой помехой становится малой, поэтому данный метод обычно рассматривается как часть комплексных систем радиоэлектронного воздействия [4].

Помеха в части полосы занимает лишь фрагмент рабочего спектра, но благодаря концентрации энергии в узком диапазоне обеспечивает существенно высокую плотность мощности по сравнению с заградительной. Именно поэтому при ограниченных ресурсах постановщика данный тип помех часто рассматривается как наиболее эффективный для систем ППРЧ [3]. Стоит отметить, что существует оптимальное соотношение между шириной подавляемой полосы и вероятностью попадания в нее очередного «прыжка»: при сужении полосы возрастает спектральная плотность мощности помехи, а при ее расширении увеличивается вероятность подавления сигнала, что формирует режим с максимальным комбинированным эффектом [5].

Следящие (реактивные) помехи основаны на обнаружении сигнала, оценке его параметров и быстром формировании воздействия на активной частоте. Их результативность в первую очередь определяется временем реакции постановщика помех, включающим этапы обнаружения, обработки, принятия решения и генерации помехи. Если скорость перестройки частоты превышает порог реакции системы подавления, эффективность воздействия следящей помехи резко снижается [4, 6].

Современные комплексы радиоэлектронного подавления применяют адаптивные алгоритмы управления с оптимизацией распределения мощности, динамического выбора полосы и каналов воздействия. В новейших исследованиях показано, что методы глубокого обучения с подкреплением позволяют выстраивать стратегии подавления частотно-перестраиваемых систем даже при отсутствии полной информации о псевдослучайной последовательности [7, 8].

В таблице 1 приведены сводные характеристики основных типов преднамеренных помех для каналов с ППРЧ [3, 5].

*Таблица 1*

Сравнение типов помех воздействующих на ППРЧ

| **Тип помехи** | **Требуемая мощность** | **Сложность реализации** | **Эффективность при «быстрой» ППРЧ** | **Эффективность при «медленной» ППРЧ** | **Основное ограничение** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Заградительная | Высокая | Низкая | Невысокая | Средняя, может подавлять связь за счет сплошного перекрытия диапазона | Низкая спектральная плотность мощности |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Узкополосная | Низкая | Низкая | Низкая, из-за малой вероятности совпадения по частоте | Выше, чем при «быстрой» ППРЧ, особенно при малом числе каналов | Малая вероятность совпадения с текущей частотой |
| Помеха в части полосы | Средняя | Средняя | Высокая, особенно при ограниченной мощности помехи | Высокая, но эффект зависит от выбора доли полосы и структуры сигнала | Необходимость выбора оптимальной доли полосы |
| Следящая | Относительно низкая | Высокая | Часто снижается из-за временного критерия, реакции | Высокая, так как постановщик успевает обнаружить и подавить активную частоту | Ограничение по задержке обнаружения и наведения |
| Адаптивная | Оптимизируемая | Очень высокая | Потенциально высокая при наличии быстрой разведки и обучения | Потенциально очень высокая за счет накопления статистики и выбора стратегии | Требования к разведке, вычислениям и обучению |

Из таблицы 1 следует, что несмотря на технологическую простоту реализации, заградительная помеха демонстрирует снижение эффективности в условиях широкополосной перестройки частот. При ограниченных энергетических ресурсах постановщика наивысшую угрозу представляют спектрально-селективные воздействия (помеха в части полосы) и следящие помехи. Для систем с высокой скоростью перестройки критическим фактором становится не абсолютная мощность излучения, а скорость адаптации стратегии подавления к изменениям частотной обстановки.

Таким образом, помехозащищенность систем с ППРЧ формируется под воздействием совокупности параметров: структуры передаваемого сигнала,

скорости перестройки несущей, архитектуры приемника и характеристик комплекса радиоэлектронного подавления. При ограниченной мощности у постановщика лучшую результативность демонстрируют методы, концентрирующие энергию в части рабочего спектра, тогда как эффективность следящих воздействий ограничивается временными задержками на этапах разведки, обработки и наведения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой адаптивных алгоритмов интеллектуального управления частотным ресурсом, интеграцией ППРЧ с помехоустойчивым кодированием, а также внедрением методов машинного обучения, в частности обучения с подкреплением, для повышения устойчивости радиосвязи в условиях эволюционирующего радиоэлектронного противодействия.

## Библиографический список


1. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
2. Чуднов, А. М. Об адаптивных алгоритмах псевдослучайного переключения рабочих частот радиолиний в условиях случайных и преднамеренных помех / А. М. Чуднов // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 4. – С. 10.
3. Козинов, И. А. Помехоустойчивость приема сигналов с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при дополнительном частотном разнесении в условиях шумовых помех / И. А. Козинов, В. В. Елишев, Я. О. Саклаков // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2023. – № 1(78). – С. 155-157.
4. Sterner U. Jamming effects on frequency-hopping ad hoc networks. Swedish Defence Research Agency, 2016. 35 p.
5. L. Jia et al., "Game Theory and Reinforcement Learning for Anti-Jamming Defense in Wireless Communications: Current Research, Challenges, and Solutions," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 27, no. 3, pp. 1798-1838, June 2025.
6. E. B. Felstead, "Follower jammer considerations for frequency hopped spread spectrum," *IEEE Military Communications Conference. Proceedings. MILCOM 98 (Cat. No.98CH36201)*, Boston, MA, USA, 1998, pp. 474-478 vol.2.
7. Slimeni F., Scheers B., Chtourou Z., Le Nir V., Attia R. Cognitive Radio Jamming Mitigation using Markov Decision Process and Reinforcement Learning // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 73. P. 106–113.
8. A. Pourranjbar, G. Kaddoum, A. Ferdowsi and W. Saad, "Reinforcement Learning for Deceiving Reactive Jammers in Wireless Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 6, pp. 3682-3697, June 2021,


© Катаскин Л.В., 2026

УДК 621.396.6:537.87

Е.Н. КАТЕРИНКИНА
*keykot19@yandex.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Е.П. ТОПОЛЬСКАЯ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА НА ОСНОВЕ ВОЛН С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ

*Аннотация*. В статье рассматривается использование орбитального углового момента электромагнитных волн для оценки параметров канала распространения. На примере нескольких работ показано, что чувствительность орбитального углового момента к пространственному рассогласованию, расстоянию и аппаратным ошибкам может использоваться для диагностики канала связи.

*Ключевые слова*: орбитальный угловой момент, оценка параметров канала, пространственное рассогласование

Современные беспроводные системы связи развиваются в условиях устойчивого роста требований к пропускной способности, спектральной эффективности и помехоустойчивости. В связи с этим, переход от четвертого поколения сетей (4G) к последующим (5G и далее к 6G) рождает поиск новых способов мультиплексирования сигналов и точного прогнозирования состояния беспроводного канала [1]. На этом фоне особый исследовательский интерес вызывает орбитальный угловой момент (ОУМ) электромагнитных волн (ЭМ-волн).

ЭМ-волна обладает общим угловым моментом, который принято подразделять на спиновую и орбитальную составляющие. Спин связан с поляризацией волны и обычно соответствует двум возможным состояниям круговой поляризации - правой и левой. В отличие от него, ОУМ не зависит от поляризационного состояния и определяется пространственным распределением фазы $e^{il\varphi}$ (где $l$ – это порядок вихревого фазового фронта радиоволны, характеризующий степень его закрученности, $\varphi$ – это азимутальный угол в плоскости, перпендикулярной направлению распространения радиоволны) [2]. При полном обороте вокруг оси распространения фаза изменяется на $2\pi l$, вследствие чего волновой фронт приобретает винтовую структуру.

Главное отличие ОУМ от спина состоит в размерности пространства состояний. Если спин дает лишь два ортогональных состояния, то ОУМ в идеализированной модели допускает бесконечное множество целочисленных мод ($l$ = 0, ±1, ±2 и т.д.), которые ортогональны друг другу. Именно эта

особенность делает ОУМ привлекательным кандидатом для мультиплексирования информационных потоков в одном и том же частотно-временном ресурсе в различных видах связи, включая волоконно-оптическую связь, беспроводную связь, радиолокацию и спутниковую связь [3].

Практическая реализация ОУМ-мультиплексирования сопряжена с рядом принципиальных ограничений. При увеличении дальности или порядка моды $l$ спиральная структура волнового фронта деградирует, что снижает «чистоту» закрученности. Фазовая структура вихревого пучка чувствительна к пространственным рассогласованиям апертур: наклоны и смещения между передатчиком и приемником нарушают ортогональность мод и вызывают межмодовую интерференцию. Помимо этого, моды с высокими значениями отличаются значительным радиальным расширением пучка, что предъявляет повышенные требования к апертуре приемной антенны или обусловливает необходимость введения дополнительных фокусирующих элементов.

Перечисленные выше ограничения применения ОУМ приводят к неожиданной гипотезе: если канал распространения оказывает столь сильное влияние на вихревую структуру ЭМ-волны, то деградация излучения вихря становится носителем информации о состоянии канала. В результате слабое место ОУМ превращается в его преимущество – новый способ для диагностики качества канала связи.

В отличие от классических моделей радиоканала, опирающихся на оценку коэффициентов затухания, временных задержек, характеристик замираний и углов распространения, ОУМ-волны описываются в модовом базисе порядков вихря $l$. В условиях идеальной соосности и прямой видимости матрица канала диагональная, что гарантирует ортогональность модовых подканалов. Однако пространственные рассогласования, атмосферная турбулентность и многолучевые эффекты нарушают чистоту генерируемого вихря, порождая ненулевые внедиагональные элементы и перераспределение энергии между модами [4]. Следовательно, зная аналитическую зависимость модовой матрицы от геометрических несоответствий или возмущений среды, можно решать обратную задачу: восстанавливать расстояние, смещение, углы рассогласования или параметры турбулентности непосредственно по измеренному спектру принятых мод.

В работе [5] ОУМ применяется для оценки угловых параметров (угол прихода сигнала - angle of arrival, AoA) с помощью метода многомерного анализа Multi-Time ESPRIT. Обычно метод ESPRIT используется для высокоточной оценки параметров источников сигнала за счет использования инвариантных подпространств: временного и частотного, а при наличии ОУМ добавляется также и модовая составляющая, то есть алгоритм получает дополнительный множитель для оценки. Благодаря проведенному анализу авторы смогли определить углы прихода сигнала не только по пространственным сдвигам между элементами решетки, но и по закономерностям распределения энергии и фазы между модами, что может

быть использовано для оценки многопользовательских сценариев в условиях многолучевого распространения.

Статья [6] рассматривает ОУМ как средство для оценки расстояния и рассогласования на основе анализа собственных мод ЭМ-поля. При малейшем смещении положений передатчика и приемника и изменении дистанции между ними модовый состав принятого ОУМ-сигнала деформируется, что способствует анализу деградации канала связи. На основе этого заключения был разработан алгоритм оценки принятого вихря и дальнейший подбор заданных параметров сигнала (расстояние, боковое смещение, углы наклона) с целью реконструкции закрученной ЭМ-волны на приемной стороне. Тем самым деградация вихря предстает обратимой деформацией при знании параметров рассогласования приемо-передающего тракта и расстояния.

В [7] авторы показывают, что фазовая структура вихря позволяет реализовать процедуру самокалибровки системы без использования внешних пилот-сигналов или априорных данных о взаимном расположении антенн. Поскольку спиральный волновой фронт реагирует на пространственное рассогласование антенных решеток, возникающие искажения в принятом сигнале несут информацию о текущем состоянии канала. Оценка этих искажений в широкой полосе частот позволяет восстановить геометрические параметры тракта и скомпенсировать аппаратные погрешности. Следовательно, оценка параметров канала превращается из вспомогательной операции во встроенный механизм самокалибровки, который в реальном времени корректирует межмодовую интерференцию и восстанавливает спектральную эффективность системы исключительно за счет анализа самого ОУМ.

Таким образом, ОУМ следует рассматривать не только как дополнительную степень свободы для мультиплексирования, но и как чувствительный индикатор состояния канала распространения. Именно высокая зависимость ОУМ от расстояния, углов распространения, пространственного смещения, наклона приемной апертуры и амплитудно-фазовых ошибок элементов делает возможным его использование в задачах оценки состояния канала связи не только в системах связи, оперирующих ОУМ-сигналами, но и в системах передачи мультимедийных данных 5G и 6G.

## Библиографический список

1. Noor S. K. *et al*., «A Review of Orbital Angular Momentum Vortex Waves for the Next Generation Wireless Communications», *IEEE Access*, vol. 10, pp. 89465-89484, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3197653

2. Allen L., Beijersbergen M. W., Spreeuw R. J. C., Woerdman J. P., «Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre– Gaussian laser modes», Phys. Rev. A, Gen. Phys., vol. 45, no. 11, pp. 8185–8189, Jun. 1992.

3. Firdous F., Kadlimatti R. «Generation Techniques of Orbital Angular Momentum Beams for Wireless Communication Applications», *IEEE Access*, vol. 13, pp. 88174-88199, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3569702.

4. Ji W., Wang C. X., Huang J., Yang R., «A Novel 3D Wideband Time-Varying Channel Model for Orbital Angular Momentum Communication Systems», 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, TX, USA, 2022, pp. 974-979, doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771804.

5. Long W. X., Chen R., Moretti M., Li J., «AoA Estimation for OAM Communication Systems With Mode-Frequency Multi-Time ESPRIT Method», IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 5, pp. 5094-5098, May 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3070358.

6. Liu Z., Liao S., Xue Q., «Distance and Misalignment Estimations of OAM Waves Based on Eigenfield Mode Analysis», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 74, no. 1, pp. 1239-1244, Jan. 2026, doi: 10.1109/TAP.2025.3622372.

7. Zhang Y., Sun X., Zhou J., Chen F., Li S., «Wideband Blind Calibration for UCA OAM Communication System», IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 11, pp. 2596-2600, Nov. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3202822.

© Катеринкина Е.Н., 2026

УДК 621.398

Д.С. БАЖАНОВ
interesnoe2003@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.М. КОМИССАРОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ LORAWAN ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОКВАРТИРНОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ В МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМАХ

*Аннотация*. В статье рассматривается применение технологии LoRaWAN для автоматизированного сбора показаний индивидуальных приборов учета воды и электроэнергии в многоквартирных жилых домах. Проведен сравнительный анализ беспроводных протоколов, обоснован выбор LoRaWAN по критериям энергоэффективности и проникающей способности сигнала.

*Ключевые слова*: LoRaWAN; телеметрия; интернет вещей; многоквартирный дом; приборы учета; автоматизация ЖКХ.

Автоматизация сбора показаний приборов учета в жилищно-коммунальном хозяйстве позволяет отказаться от ручных обходов и бумажных квитанций, повысить точность выставления счетов и оперативно выявлять протечки или нештатное потребление. Для многоквартирных домов система телеметрии должна обеспечивать хорошее прохождение сигнала через несколько железобетонных перекрытий, иметь низкое энергопотребление оконечных устройств и быть масштабируемой на сотни квартир. Среди

существующих беспроводных технологий данным требованиям лучше всего соответствует LoRaWAN – протокол, работающий в нелицензируемом диапазоне EU868 (863–870 МГц) и использующий модуляцию с линейной частотной модуляцией (Chirp Spread Spectrum). Далее рассмотрим архитектуру и основные расчеты такой системы для типового жилого дома.

Для поквартирной телеметрии нет необходимости в высокой скорости передачи данных, будет достаточно нескольких десятков байт на датчик в сутки. Проблема беспроводной передачи заключается в другом: Wi-Fi и Zigbee имеют малую проникающую способность через перекрытия и требуют развертывания множества точек доступа или маршрутизаторов. Сотовая связь NB-IoT требует абонентской платы оператору и не всегда уверенно работает в подвалах и технических этажах. LoRaWAN же предлагает уникальное сочетание: чувствительность приемника до –140 дБм, дальность до 15 км на открытой местности и ток потребления в режиме сна менее 1 мкА. Адаптивный коэффициент расширения спектра (Spreading Factor, SF от 7 до 12) позволяет плавно менять дальность и помехоустойчивость, но при этом теряя скорость. Для передачи показаний счетчиков выбирается SF12 – самая низкая скорость (около 290 бит/с), зато максимальная устойчивость и проникновение сквозь железобетонные перекрытия.

Классическая система состоит из четырех уровней. На нижнем уровне располагаются индивидуальные приборы учета, оснащенные LoRaWAN-модулями. Для счетчиков воды используются устройства класса A по стандарту LoRaWAN: они активируются из режима глубокого сна только на время передачи, после чего снова уходят в сон, что обеспечивает срок службы батареи около 5–10 лет. Для счетчиков электроэнергии можно применить класс C – постоянное прослушивание канала, так как питание берется от сети.

Второй уровень – LoRaWAN-шлюз (обычно 8- или 16-канальный), устанавливаемый в телекоммуникационном шкафу здания. Шлюз принимает радиопакеты от всех датчиков и передает их по Ethernet (или Wi-Fi) на сетевой сервер через стандартные протоколы (MQTT, HTTPS).

Третий уровень – сетевой сервер (например, открытый стек ChirpStack). Он дешифрует пакеты, проверяет их целостность, устраняет дубликаты и управляет параметрами радиосети.

Четвертый уровень – сервер приложений и биллинговая система. Здесь декодируются полезные данные (показания, статус батареи) и автоматически формируются квитанции для жильцов. Вся серверная часть может быть развернута на одном физическом сервере в помещении дома, что исключает ежемесячные платежи внешним операторам.

Рассмотрим типовой дом на 400 квартир. В каждой квартире три датчика (ГВС, ХВС, электроэнергия) – всего 1200 устройств. Каждый датчик отправляет 5 пакетов в сутки (показания плюс подтверждение работоспособности). Общая интенсивность пакетов:

$$\lambda = \frac{(1200 \times 5)}{(24 \times 3600)} \approx 0{,}069 \text{ пак./с}$$

Шлюз имеет 8 параллельных каналов, поэтому нагрузка распределяется: на каждый канал приходится в среднем 1,2% загрузки. Даже в вечерний час пик, когда передается до 30% суточного трафика, загрузка канала не превышает 4%, что намного ниже предела устойчивой работы (50–60%). Следовательно, одного 8-канального шлюза достаточно для дома на 400 квартир, и запас позволяет увеличить частоту опроса или добавить новые типы датчиков.

Самый сложный случай – датчик на нижнем этаже в дальнем подъезде, а шлюз на среднем этаже соседнего подъезда. Принимаем следующие параметры: мощность передатчика датчика +14 дБм, чувствительность шлюза при SF12 –140 дБм, антенна шлюза с коэффициентом 3 дБи, потери в фидере 1 дБ. Расстояние по наклонной дальности (горизонталь 80 м, вертикаль 16 м) составляет около 81 м.

Потери в свободном пространстве на частоте 868 МГц:

$$L_{\text{св}} = 20 \cdot \lg(81) + 20 \cdot \lg(868) - 147{,}55 \approx 50{,}5 \text{ дБ}.$$

Затухание в железобетонных конструкциях: для пяти перекрытий (по 12 дБ каждое) и двух внутренних стен (по 10 дБ) плюс фидер – итого:

$$L_{\text{зд}} = 5 \times 12 + 2 \times 10 + 1 = 81 \text{ дБ}.$$

Суммарные потери:

$$L_{\text{сумм}} = 50{,}5 + 81 = 131{,}5 \text{ дБ}.$$

Уровень сигнала на входе шлюза:

$$P_{\text{пр}} = 14 + 0 + 3 - 131{,}5 = -114{,}5 \text{ дБм}.$$

Запас по чувствительности:

$$\Delta = -114{,}5 - (-140) = 25{,}5 \text{ дБ}.$$

Полученный запас более 20 дБ свидетельствует о надежности радиоканала даже в присутствии дополнительных препятствий: металлических дверей, плотно заставленных комнат или временных перегородок. Для квартир, расположенных на верхних этажах или в непосредственной близости от шлюза, энергетический запас будет заведомо выше, что обеспечивает устойчивое соединение во всех зонах здания без исключения.

Совокупные затраты на развертывание системы телеметрии включают три основные составляющие. Первая – приобретение LoRaWAN-шлюза,

стоимость которого составляет порядка 50-80 тыс. руб. Вторая – серверное оборудование; при наличии в доме общедомового сервера эта статья расходов может быть минимальной или полностью отсутствовать. Третья – радиомодули для приборов учета, которые могут приобретаться жильцами самостоятельно либо включаться в общий тариф по решению управляющей компании. Текущие эксплуатационные расходы невелики: абонентская плата операторам связи не предусмотрена, а обслуживание системы сводится к периодическому контролю работоспособности шлюза и сервера. Автоматизация учета дает возможность сократить трудозатраты на сбор показаний, устранить ошибки ручного ввода и снизить число споров, связанных с некорректными начислениями.

По итогам проведенного анализа и выполненных расчетов технология LoRaWAN представляется обоснованным выбором для построения систем поквартирной телеметрии в многоквартирных жилых домах. Среди ее практических преимуществ выделяются три ключевых. Во‑первых, высокая проникающая способность сигнала в диапазоне 868 МГц, позволяющая перекрывать несколько железобетонных перекрытий без промежуточных ретрансляторов. Во‑вторых, низкое энергопотребление оконечных устройств, обеспечивающее срок службы батареи датчиков от пяти до десяти лет. В‑третьих, масштабируемость: расчеты показывают, что один 8‑канальный шлюз справляется с нагрузкой от 1200 датчиков при загрузке канала не более 4% в час пик, сохраняя значительный резерв для подключения новых устройств. Запас по радиоканалу 25,5 дБ подтверждает стабильность связи в наиболее сложных точках здания – удаленных квартирах нижних этажей. Система функционирует без регулярных платежей внешним операторам и может быть объединена с существующей мультисервисной инфраструктурой дома, что делает ее привлекательной для внедрения в рамках проектных решений по автоматизации жилищно-коммунального хозяйства.

**Библиографический список**

1. Комиссаров А.М. Канал в сети LORAWAN как система массового обслуживания. /Комиссаров А.М., Мезенцева //Проблемы техники и технологии телекоммуникаций - 2022: материалы XXIV Международной научно-технической конференции – Уфа: УУНиТ, 2022. С.86-87.

2. Банкет В. Л. Беспроводные сети LoRaWAN : принципы работы, стандартизация, расчет радиопокрытия / В. Л. Банкет, А. В. Банкет, Е. В. Ломачинская. – Одесса : Астропринт, 2019. – 212 с.

3. Виноградова, И. Л. Анализ существующих методов моделирования и новый подход к формализации конвергентных систем связи / И. Л. Виноградова, В. Х. Багманов, А. Р. Гизатуллин [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. – 2024. – № 3 (22). – С. 7–19.

© Бажанов Д.С., 2026

УДК 621.37

А.Ю. БУРДИНА
*a.y.burdina@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент А.З. ТЛЯВЛИН

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ

*Аннотация*. В статье рассмотрены вопросы разработки и изготовления безэховой камеры, предназначенной для проведения экспериментов и настройки различных устройств, работающих в СВЧ-диапазоне.

*Ключевые слова*: безэховая камера; защита от помех; радиопрозрачный пластик; лабораторный стенд; радиопоглощающие материалы; экранирование.

При разработке и сертифицирования радиоэлектронного оборудования, например антенн сотовой связи или бортовых систем самолетов, требуется особая среда. Без нее точность измерении оборудования будет снижена из-за помех. Эту среду помогает создать радиочастотная безэховая камера: она подавляет отражения электромагнитных волн и блокирует внешние радиочастотные помехи, обеспечивая чистоту измерений и испытаний.

В рамках работы произведено проектирование и изготовление специализированной безэховой камеры. Создаваемое оборудование позволит проводить комплексные эксперименты и настройку радиоэлектронных и иных устройств минимизируя внешние помехи и отражения сигналов.

Представленная на рисунке 1 камера изготовлена из: металлического ящика с внутренней облицовкой из акустического поролона и внешним покрытием из экранирующей ткани. Поролон подавляет внутренние помехи за счет многократного отражения и рассеяния электромагнитных волн.

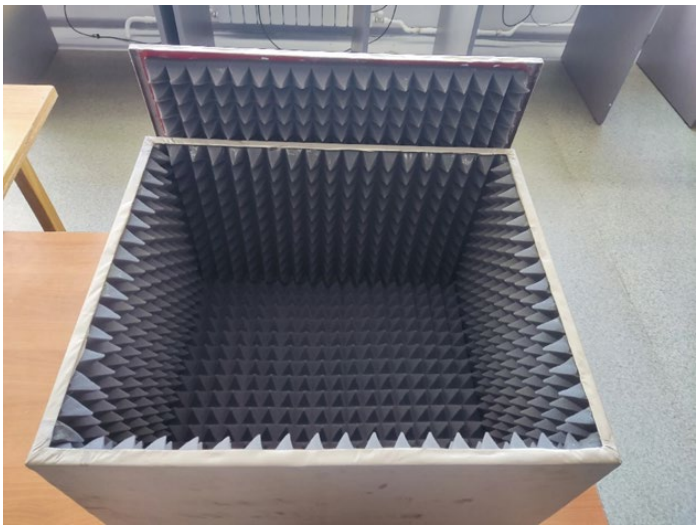


*Рис. 1.* Реализация лабораторного стенда

Металлический ящик — это экранированный корпус безэховой камеры. Он представляет собой герметичную конструкцию, собранную из отдельных стальных панелей. По сути, это клетка Фарадея. Главная задача, которой - блокировать проникновение внешних электромагнитных полей внутрь камеры и предотвращать утечку излучения наружу.

Чтобы ящик выполнял функции клетки Фарадея, необходимо обеспечить:

– Непрерывность электрического контакта между всеми частями конструкции.

Все панели должны плотно прилегать друг к другу. Для этого в местах скрепления панелей зачистили краску, создающую изоляционный слой и мешающий электрическому контакту. Зачистка позволила добиться прямого металлического соприкосновения деталей, что критически важно для работы системы как единого экрана;

– Минимальное переходное сопротивление в местах соединений.

Даже небольшой зазор или изоляционный слой (например, остатки краски или ржавчины) могут нарушить экранирование и снизить эффективность системы. После зачистки поверхностей панели надежно соединили с помощью болтов обеспечив плотный контакт и снизило сопротивление в зонах стыков;

– Герметичность конструкции.

Любые щели или незащищенные отверстия могут стать «дверью» для проникновения электромагнитных волн. Для дополнительной защиты и перекрытия мелких зазоров, которые сложно устранить чисто механической сборкой, ящик дополнительно покрыла экранирующей тканью. Она закрыла микрощели и неровности по стыкам панелей, усилила общий уровень экранирования, обеспечила дополнительную защиту в зонах, где сложно добиться идеального прилегания металла.

Внутри камеры разместила акустический поролон для создания чистой измерительной среды. Материал ловит электромагнитные волны многократно отражая их благодаря своей структуре. По итогу они теряют энергию и затухают. Благодаря этому:

– снижается интенсивность отраженных сигналов;

– исчезает эффект стоячих волн и радиочастотного «эха»;

– устраняются искажения, мешающие точным измерениям.

Внутри камеры планируется разместить разработанные автором подставки из радиопрозрачного пластика (рис.2), предусматривающие регулировку высоты и угла направленности. На них будут размещены передатчик и приемник сигнала, построенные на базе ESP8266. Устройства настроили так, чтобы они могли передавать и принимать Wi‑Fi на частоте 2,4 ГГц.

Предварительное измерение эффективности, проведенное приложением Network Cell Info Lite показало значение - 40 дБ.

Для повышения универсальности безэховая камера была спроектирована так, что при надобности можно установить направляющие. Они предназначены

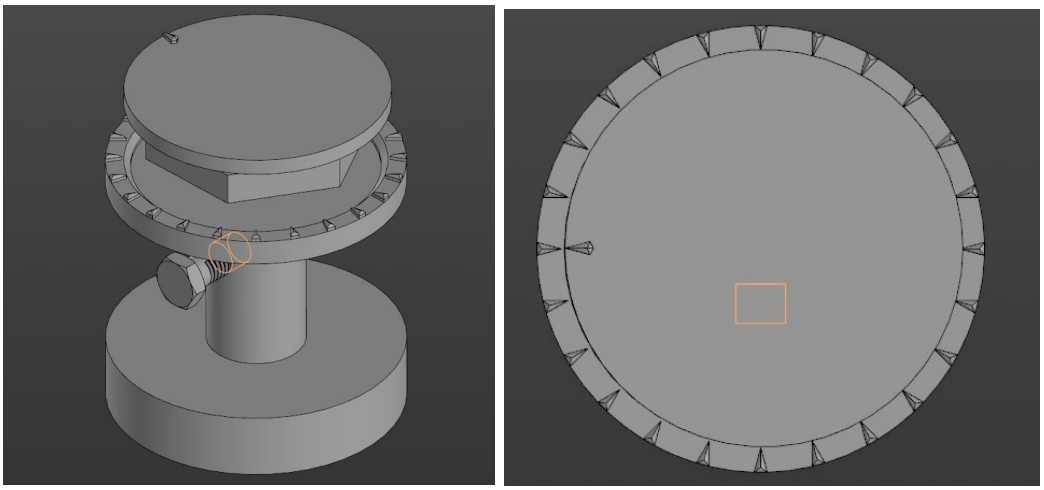
для установки различных внутренних экранов (дополнительных радиопоглощающих панелей или экранирующих перегородок). Благодаря направляющим можно:

– оперативно менять конфигурацию внутреннего пространства;

– адаптировать камеру под разные типы испытаний;

– размещать оборудование и вспомогательные экраны точно в заданных позициях;

– создавать отдельные зоны с разными условиями внутри одной камеры.



*a* *b*

*Рис. 2.* Авторская подставка из радиопрозрачного пластика:
*a* – подставка вид с боку;
*b* -подставка вид сверху.

При радиочастотных испытаниях компактной электроники небольшие безэховые камеры становятся практичным выбором для лабораторий с ограниченной площадью. Экранирующий корпус, выполненный по принципу клетки Фарадея, блокирует внешние помехи, а внутреннее покрытие из радиопоглощающих материалов (акустического поролона или аналогичных составов) гасит отражения сигналов внутри рабочей зоны. Такое сочетание обеспечивает точность измерений даже в стесненных условиях, когда объем камеры невелик.

Созданная камера предоставляет возможность комплексного тестирования миниатюрных антенн, датчиков и модулей связи, а также калибровку измерительного оборудования. Благодаря компактности ее без проблем можно разместить даже в небольшом учебном классе или лаборатории.

## Библиографический список

1. Кох А. В., Шевченко С. С. Лабораторный стенд по исследованию электромагнитного экранирования // Вестник КГЭУ. 2017. № 4 (36). С. 134–140.

// URL:https://cyberleninka.ru/article/n/laboratornyy-stend-po-issledovaniyuelektromagnitnogo-ekranirovaniya

2. Гутник С. А., Гутник В. С. Исследование эффективности экранирования электромагнитных излучений и шума. // URL:https://lib.sevsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/8409/%D1%80_180042.pdf?sequence=1&isAllowed=y

3. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov/viewer

© Бурдина А.Ю., 2026

УДК 004.713

П.С. ОПОМАХ
*mr.opomakh@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.М. КОМИССАРОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПОДХОД К ТЕСТИРОВАНИЮ СЕТЕВЫХ КОММУТАТОРОВ

*Аннотация*. В статье рассматривается необходимость нагрузочного тестирования коммутаторов для оценки их реальной отказоустойчивости. Статья изучает влияние нагрузочного тестирования на выявление архитектурных узких мест и приближении тестирования к условиям эксплуатации критически важных сетей.

*Ключевые слова*: коммутаторы; тестирование; нагрузочное тестирование.

Надежность сетевой инфраструктуры сегодня напрямую связана с качеством проверки активного оборудования до его ввода в эксплуатацию. Для корпоративных и промышленных сетей особое значение имеют коммутаторы, от стабильности которых зависит непрерывность обмена данными, доступность сервисов и устойчивость внутренних цифровых контуров. Актуальность темы связана с тем, что паспортные характеристики оборудования не всегда отражают его поведение при пиковом трафике, перегрузке буферов, изменении топологии и длительной работе в предельных режимах. Именно по этой причине нагрузочное тестирование все чаще рассматривается не как дополнительная процедура, а как один из базовых подходов к оценке качества коммутационных устройств.

В области тестирования коммутаторов существуют стандарты, позволяющие системно измерять пропускную способность, задержку, потери кадров, поведение устройства при перегрузке и особенности обработки multicast-трафика. На этом фоне становится особенно заметно, что

практическая ценность тестирования коммутаторов определяется не только фиксацией предельных метрик, но и способностью выявлять признаки деградации работы задолго до полного отказа оборудования. Для отечественных решений такой подход приобретает дополнительную значимость в условиях курса на технологическую независимость и роста требований к отказоустойчивости сетевой инфраструктуры.

Цель статьи заключается в раскрытии нагрузочного тестирования как современного подхода к проверке сетевых коммутаторов с акцентом на его роль в оценке отказоустойчивости оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить две задачи. Первая задача состоит в рассмотрении теоретических основ и стандартов тестирования сетевых коммутаторов. Вторая задача связана с анализом нагрузочного тестирования как практического инструмента выявления предельных режимов работы и оценки устойчивости коммутаторов к перегрузкам.

Объектом статьи выступают сетевые коммутаторы как ключевой элемент телекоммуникационной инфраструктуры.

Важную роль в развитии методик сыграли стандарты серии Request for Comments (RFC). Методики тестирования коммутаторов современных производителей сетевого оборудования основываются именно на стандартах RFC.

Стандарт RFC 2544 определяет методику измерения основных рабочих характеристик коммутатора: достижимой пропускной способности, уровня потерь кадров при различных нагрузках, вносимых задержек и способности устройства непрерывно обрабатывать потоки кадров без пропусков. Полученные данные формируют количественную базу для первичной оценки возможностей оборудования, однако охватывают преимущественно упрощенные условия взаимодействия и не в полной мере отражают поведение устройства в сложных сетевых сценариях.

Стандарт RFC 2889 расширяет эту картину применительно к коммутаторам локальных сетей. В отличие от RFC 2544, где тестирование выстроено вокруг простейшей схемы двух взаимодействующих портов, RFC 2889 переносит акцент на многопортовую логику коммутации и полносвязные топологии. В числе исследуемых явлений – блокировка HOL (англ. Head-of-Line), характеристики процедуры обучения MAC‑адресам и предельная емкость таблиц коммутации. Такой набор процедур позволяет выявить архитектурные причины деградации и особенно важен для оценки поведения коммутатора в моменты распределения ресурсов между большим числом параллельных потоков.

Не менее существенную роль играет RFC 3918, ориентированный на IP‑multicast. В этом документе основное внимание уделено смешанным трафиковым сценариям, масштабируемости многоадресных групп, задержкам при присоединении и выходе из групп, а также влиянию этих процессов на качество обслуживания. С практической точки зрения такой подход позволяет

рассматривать коммутатор не только как устройство пересылки единичных кадров, но и как элемент системы с более сложной логикой репликации и управления трафиком. На фоне распространения сервисов реального времени такой ракурс оценки становится все более востребованным.

В совокупности теоретическая основа тестирования коммутаторов опирается на несколько взаимосвязанных идей. Первая связана с необходимостью многоуровневой проверки, учитывающей как базовые, так и сложные режимы работы. Вторая — с унификацией методик измерений на базе стандартов, обеспечивающих сопоставимость результатов. Третья идея заключается в том, что фиксации лишь максимальной скорости передачи данных уже недостаточно: гораздо важнее определить момент начала деградации, понять, какие механизмы устройства оказываются наиболее уязвимыми, и насколько лабораторные сценарии отражают реальные условия эксплуатации. В рамках именно такой логики повышенное внимание уделяется нагрузочному тестированию как более прикладному и содержательному подходу. Переход от нормативных методик к практической проверке коммутаторов особенно важен в тех случаях, когда требуется не просто подтвердить соответствие устройства набору стандартных метрик, а понять его поведение под реальной и предельной нагрузкой. Для сетевой инфраструктуры предприятий критическое значение имеет не максимальная скорость, а способность оборудования удерживать рабочее состояние при росте интенсивности трафика, переполнении буферов, изменении схемы передачи кадров и длительной работе на верхней границе допустимых параметров. По этой причине нагрузочное тестирование все чаще рассматривается как основной прикладной подход к оценке отказоустойчивости коммутационного оборудования.

Практический смысл такого подхода хорошо раскрывается через различие между формальной работоспособностью и устойчивой работоспособностью. Коммутатор может корректно выполнять базовые функции в обычном режиме, но терять кадры, увеличивать задержку или нестабильно обрабатывать служебные события при усложнении трафикового профиля. В моей выпускной квалификационной работе акцентируется внимание на том, что отказ в сетевом оборудовании не всегда проявляется как полная остановка устройства. Намного чаще сначала возникает деградация параметров. Снижается пропускная способность, растет задержка, появляются эпизодические потери пакетов, медленнее обновляются таблицы MAC адресов, увеличивается время реакции управляющей плоскости. Для эксплуатационной практики такие состояния не менее значимы, чем полный сбой, поскольку именно они нарушают стабильность цифровых сервисов.

Нагрузочное тестирование ценно тем, что позволяет зафиксировать границу перехода от штатного режима к деградации. В этом и состоит его отличие от обычной демонстрации пиковой производительности. При грамотной постановке эксперимента проверяется не один показатель, а совокупность взаимосвязанных параметров. К основным оцениваемым

параметрам относятся пропускная способность, доля потерянных кадров, задержка передачи, устойчивость к кратковременным всплескам трафика, поведение устройства при трафике по схеме «многие-к-одному», скорость обучения MAC-адресов и реакция на многоадресную нагрузку. Когда эти показатели оцениваются совместно, появляется более реалистичная картина внутренней архитектуры коммутатора. Подобный анализ позволяет локализовать проблемные участки архитектуры устройства: узкое место может находиться в коммутационной матрице, буферной памяти, таблицах пересылки или в логике управляющей плоскости.

С прикладной точки зрения нагрузочные испытания одновременно решают несколько взаимосвязанных задач. Первая – установление фактических границ работоспособности устройства в условиях, приближенных к реальным. Вторая – сопоставление задекларированных производителем характеристик с показателями, полученными в ходе независимых измерений. Третья – обнаружение ранних признаков деградации прежде, чем они приведут к полному отказу. На основе таких данных появляется возможность обоснованно выбирать оборудование под конкретные сетевые сценарии – особенно там, где перебои в работе недопустимы, то есть в системах критической инфраструктуры.

Совокупность перечисленных свойств позволяет рассматривать нагрузочное тестирование как метод комплексной диагностики поведения коммутатора под нагрузкой, направленный на снижение операционных рисков. Принципиальное преимущество такого подхода заключается в том, что экспериментальные условия воспроизводят реальную эксплуатационную обстановку, а не абстрактные стендовые сценарии, и позволяют проследить динамику устойчивости устройства во времени. Именно поэтому данный метод все увереннее занимает место обязательного этапа верификации при вводе коммутационного оборудования в эксплуатацию.

Проведенный анализ подходов к испытаниям сетевых коммутаторов подтвердил, что качественная оценка такого оборудования не может ограничиваться проверкой базовых функций и сравнением с паспортными значениями. В ходе теоретического рассмотрения были выделены ключевые нормативные документы, регламентирующие испытания в данной области: RFC 2544, RFC 2889 и RFC 3918. Эти стандарты задают согласованную процедуру измерения пропускной способности, задержек, потерь кадров, поведения при перегрузке и особенностей обработки multicast-трафика, формируя содержательную точку отсчета для оценки коммутатора.

Наиболее значимые практические выводы связаны с рассмотрением нагрузочного тестирования как инструмента, ориентированного не на формальное подтверждение работоспособности, а на обнаружение момента начала деградации: перегрузки буферов, нарастания задержек, появления потерь кадров. Полученные данные убедительно свидетельствуют о том, что отказ коммутатора в большинстве случаев не наступает мгновенно — ему

предшествует постепенное ухудшение совокупности рабочих параметров. Из этого следует, что нагрузочное тестирование представляет собой действенный инструмент раннего выявления уязвимых мест и формирования объективной картины отказоустойчивости оборудования.

**Библиографический список**

1. Гольдштейн Б. С. Сети связи : учебник для вузов / Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

2. Давыдов А. Е. Проектирование телекоммуникационных систем и сетей / А. Е. Давыдов. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2015.

3. Кучерявый А. Е. Сети связи следующего поколения / А. Е. Кучерявый, А. Л. Цуприков. – Москва : ФГУП ЦНИИС, 2006. – 278 с.

4. Олифер В. Г. Компьютерные сети : принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – Юбилейное изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2021. – 1008 с.

5. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. – 5-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2012. – 960 с.

6. Быстрое оптическое переключение: анализ существующих решений и новый метод, обеспечивающий коммутацию сигналов/пакетов в мультисервисных сетях / И. Л. Виноградова, Е. Ю. Головина, А. М. Комиссаров [и др.] // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11, № 5. – С. 97–118.

7. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2016.

8. ГОСТ IEC 60947-1–2017. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 1. Общие правила. – Москва : Стандартинформ, 2019.

9. ГОСТ Р 51901.5–2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. – Москва : Стандартинформ, 2005.

10. Bradner S. Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices : RFC 2544 / S. Bradner, J. McQuaid. – IETF, 1999. – URL: https://www.ietf.org/rfc/rfc2544 (дата обращения: 28.04.2026).

11. Mandeville R. Benchmarking Methodology for LAN Switching Devices : RFC 2889 / R. Mandeville, J. Perser. – IETF, 2000. – URL: https://www.ietf.org/rfc/rfc2889 (дата обращения: 28.04.2026).

12. Stopp D. Methodology for IP Multicast Benchmarking : RFC 3918 / D. Stopp, B. Hickman. – IETF, 2004. – URL: https://www.ietf.org/rfc/rfc3918 (дата обращения: 28.04.2026).

13. IEEE Std 802.3-2022. IEEE Standard for Ethernet. – IEEE Standards Association, 2022. – URL: https://standards.ieee.org/standard/802_3-2022.html (дата обращения: 28.04.2026).

14. ISO/IEC/IEEE 8802-1Q:2020. Telecommunications and exchange between information technology systems – Requirements for local and metropolitan area networks – Part 1Q: Bridges and bridged networks. – ISO, 2020. – URL: https://www.iso.org/standard/84082.html (дата обращения: 28.04.2026).

© Опомах П.С., 2026

УДК 004.3

З.З. ГАЛЕЕВ, П.А. ФЕШКОВА, С.У. СИТДИКОВ
*gazuza050603@gmail.com, polinafeshko@yandex.ru, mr.sagit@vk.com*
Науч. руководитель – кандидат технических наук, доц. И.К. МЕШКОВ.

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ ARDUINO UNO И МИКРОФОНА MAX9814

*Аннотация*. В данной работе представлен стенд для записи и обработки акустических сигналов. Стенд построен на плате Arduino UNO и микрофоне MAX9814 с автоматической регулировкой усиления (AGC). Разработаны схематические решения, включая ручную пайку микрофонного модуля и реализующие алгоритмы мало-задержанного звука.

*Ключевые слова:* Arduino Uno, MAX9814, AGC, АЦП, системы реального времени, лабораторный стенд, Python, Visual Studio.

Исследование акустических сигналов является очень важной частью учебного процесса в области информационных и инженерных дисциплин. В ходе проведения данных исследований студенты могут изучать цифровую обработку сигналов, научиться отфильтровывать шумы, получать и анализировать спектрограммы, выделяя при этом для себя полезную информацию. Высокие возможности и направленность данной тематики делают данное исследование основой для проектно-ориентированного обучения, позволяя закрепить теоретические знания через решение реальных исследовательских задач. Для того, чтобы исследовать акустические сигналы был создан проект лабораторного стенда.

Проведя анализ микрофонов выбор пар на MAX9814 с АРУ, так как он имеет автоматическая регулировку усиления (АРУ): Усилитель автоматически делает тихие звуки громче, а громкие — тише, предотвращая перегрузку. Например человек говорит тихо( АРУ поднимает уровень распознавания стабильности) , если человек говорит громко ( АРУ приглушает , но при этом форма сигнала может искажаться) ,удар по двери короткий (без АРУ -хорошо виден пик , легко детектировать , с АРУ - давит пик , удар выглядит более длинным и сглаженным ) , разбитие стекла -есть четкая спектральная картина (АРУ может изменить спектр , сделав его более плоским ) , фоновый шум ( постоянный низкий уровень звука, АРУ-воспринимает данный звук как тихий , усиливает его , шум на заднем фоне становиться громче и более выраженный). Несмотря на указанные особенности, наличие АРУ обеспечивает расширение эффективного динамического диапазона и упрощает предварительную обработку сигнала в условиях нестабильной акустической среды. В [1]

представлено полное описание данного микрофона и его технические характеристики.

Экспериментальный измерительный стенд реализован на базе микроконтроллерной платформы Arduino UNO и микрофонного модуля MAX9814. Выбор платформы обусловлен ее архитектурной открытостью, развитой экосистемой периферийных библиотек и аппаратной поддержкой многоканального аналого-цифрового преобразования. Монтаж компонентов осуществлен методом пайки, что обеспечило минимизацию переходных сопротивлений и повышение механической надежности электрических соединений. Электрическое подключение реализовано по трехпроводной схеме: линия общего потенциала (GND) объединена, цепь питания модуля (VDD) запитана от стабилизированного источника +5 В микроконтроллера, а аналоговый выход подключен к входу встроенного АЦП (канал A0). В [2] представлено описание платы и ее библиотека.

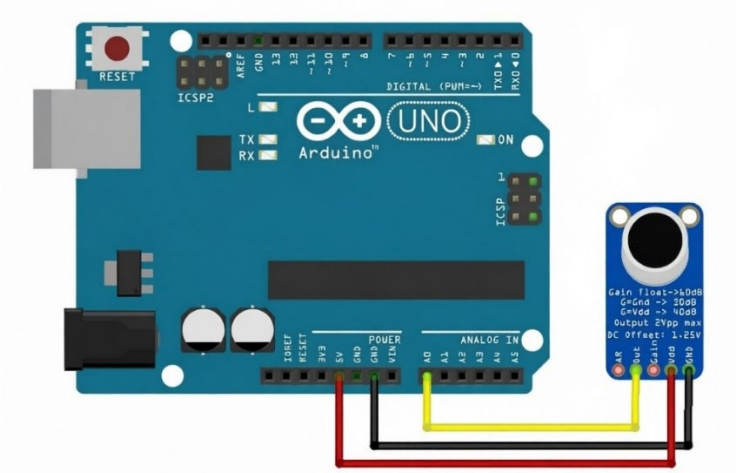



*Рис. 1.* Лабораторный измерительный стенд на базе микрофонного модуля MAX9814 и платформы Arduino UNO

Программная реализация системы разделена на два уровня. Встроенное программное обеспечение микроконтроллера разработано на языке C++ в среде Arduino IDE и обеспечивает задачи непрерывной оцифровки аналогового сигнала, первичной цифровой фильтрации и передачи цифровых отсчетов по асинхронному последовательному интерфейсу UART на персональный компьютер. На стороне хоста разработано прикладное программное обеспечение на языке Python (среда разработки Visual Studio), выполняющее функции приема потоковых данных, буферизации и сохранения в аудиофайл формата WAV с заданными параметрами частоты дискретизации и битрейта с использованием стандартной библиотеки wave. В [4] показаны руководство Python, справочник по библиотекам, настройка и использование. В [5] представлена инструкция по настройке Visual Studio.

Дополнительно реализован модуль визуализации спектрально-временных характеристик сигнала в режиме реального времени на базе алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ).

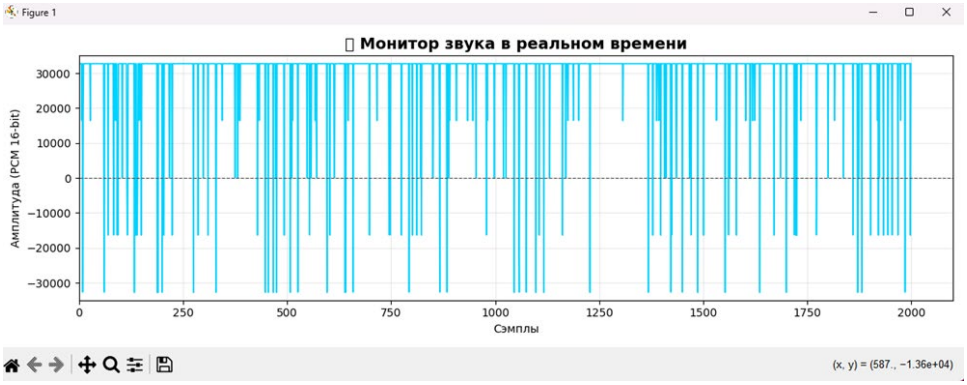



*Рис. 2.* Интерфейс мониторинга акустического сигнала в реальном времени

Экспериментальная валидация работоспособности стенда проведена в условиях контролируемой акустической среды лабораторного помещения. В ходе параметрической оптимизации системы установлены следующие рабочие режимы. Оптимальная частота дискретизации АЦП составила 5000 Гц, что обеспечивает достаточную разборчивость речевых сигналов в полосе частот до 2,5 кГц в соответствии с теоремой Котельникова [10] и минимизирует задержки буферизации.

Снижение частоты дискретизации приводит к алиасингу и потере информативности спектра, а увеличение — к переполнению буфера передачи и увеличению латентности записи. В качестве оптимальной скорости передачи данных по последовательному интерфейсу выбрано значение 115 200 бод, обеспечивающее стабильную кадровую синхронизацию и пропускную способность, достаточную для непрерывного потока отсчетов.

Отклонение в сторону снижения скорости ограничивает полосу пропускания канала, а превышение данного значения приводит к периодическим ошибкам синхронизации UART и потере пакетов данных.

Таким образом, была выполнена задача разработки лабораторного, который в будущем сможет реализовать цикл лабораторных работ для исследования акустических сигналов для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи». [6–9].

## Библиографический список

1. MAX9814 Datasheet [Электронный ресурс]. – Maxim Integrated Products, 2014. – 21 с. – Режим доступа: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX9814.pdf (дата обращения: 20.04.2026).

2. Arduino Uno Rev3 [Электронный ресурс]. – Arduino Official Website. – Режим доступа: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3 (дата обращения: 20.04.2026).

3. ATmega328P Datasheet [Электронный ресурс]. – Microchip Technology Inc., 2016. – 508 с. – Режим доступа: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf (дата обращения: 20.04.2026).

4. Python Software Foundation. Python 3.x Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.python.org/3/ (дата обращения: 20.04.2026).

5. Microsoft Corporation. Visual Studio Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.microsoft.com/ru-ru/visualstudio/ (дата обращения: 20.04.2026).

6. Oppenheim A.V. Digital Signal Processing / A.V. Oppenheim, R.W. Schafer. – Pearson, 2014. – 1104 с. – ISBN 978-0131988422.

7. Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / S.W. Smith. – California Technical Publishing, 1997. – 650 с. – ISBN 978-0966017632.

8. Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino / В.А. Петин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 464 с. – ISBN 978-5-9775-4007-2.

9. Монк С. Программируем Arduino: основы работы со скетчами / С. Монк. – СПб.: Питер, 2017. – 192 с. – ISBN 978-5-496-02415-3.

10. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи / В.А. Котельников // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762–770. (Перевод классической работы 1933 года).

© Галеев З.З., Фешкова П.А., Ситдиков С.У., 2026

УДК 654.16

В.Н. ДУДИНОВ
*dudinov2002@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент. И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ КОГНИТИВНОГО РАДИО

*Аннотация.* Рассматривается проблема неэффективного использования радиочастотного спектра, обусловленная статическими методами его распределения. В качестве перспективного решения предлагается технология когнитивного радио (CR), позволяющая вторичным пользователям оппортунистически использовать временные и пространственные «спектральные дыры» без создания помех лицензированным (первичным) пользователям.

*Ключевые слова*: когнитивное радио, радиочастотный спектр, спектральные «дыры», когнитивный цикл, зондирование спектра, первичный пользователь, вторичный пользователь.

Возможность использования радиочастотного спектра максимально эффективно давно интересует многих научных деятелей в области телекоммуникаций и связи. Причина этого заключается в его ограниченности как природного ресурса и растущей потребности в передаче все больших объемов информации. Однако, полосы, используемые для передачи данных не загружены полностью все время, а лишь в определенные моменты, так называемые ЧНН (час наибольшей нагрузки). В остальные моменты они либо недогружены, либо вообще не используются. Согласно обширным исследованиям в зависимости от местоположения и времени, использование спектра колеблется от 16 до 87% [1]. Именно поэтому технология Когнитивного радио представляет один из вариантов решения данной проблемы.

Когнитивное радио считается перспективной технологией, позволяющей задействовать не полностью неиспользуемый спектр [2, 3]. Главная причина неэффективного использования спектра заключается в текущих подходах к его распределению. Когнитивное радио предлагает возможное решение, задействуя «белые пятна» и не причиняя помех лицензированному пользователю [4]. Основная цель когнитивного радио — эффективно применять эти спектральные «дыры» для передачи данных. Будучи интеллектуальной системой, когнитивное радио хорошо справляется с обнаружением и использованием «белых пятен» для связи. Эти участки спектра эксплуатируются до того момента, пока они не понадобятся лицензированному пользователю. Когда лицензированный абонент становится активным, вторичный когнитивный пользователь либо покидает данную полосу частот и переходит на другое «белое пятно», либо изменяет свои передающие параметры так, чтобы лицензированный пользователь не ощущал помех.

Вторичный когнитивный пользователь может применять спектральную «дыру», которая образуется, когда в определенном месте и в течение определенного промежутка времени отсутствует активный первичный пользователь [5]. Такой тип спектральной «дыры» называется временной спектральной дырой. В свою очередь, пространственная спектральная дыра возникает во внешней области, когда некоторая частота используется первичным пользователем в конкретной зоне, но остается свободной за пределами зоны покрытия этого первичного пользователя (Рис.1, Рис.2). Передача данных в пространственных спектральных дырах допустима только при условии, что она не создает помех близко расположенным приемникам первичных пользователей.




*Рис. 1.* Зона защиты первичного передатчика. Временные спектральные дыры

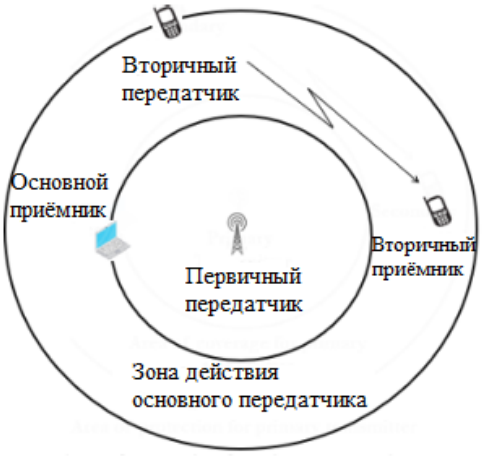



*Рис. 2.* Зона защиты первичного передатчика. Пространственные спектральные дыры

Базовая архитектура когнитивного цикла, применяемого в когнитивном радио (КР) показана на Рис.3. Главная задача этого цикла — сканирование частотного диапазона, анализ полученных данных о спектре, обеспечение доступа к свободным частотам и переключение между разными частотными диапазонами [6]. Именно поэтому КР называют «интеллектуальной» беспроводной технологией. Такое название оправдано благодаря его оперативной реакции и способности воспринимать окружающую радиообстановку. В сети КР функционирует множество интеллектуальных станций. Эта технология позволяет распознавать телекоммуникационные технологии и сетевые взаимодействия в ближайшем окружении. Система когнитивного радио состоит из трех основных элементов: мобильной станции, базовой станции и опорных сетей [7].




*Рис. 3.* Архитектура КР

Зондирование спектра открывает возможность оппортунистического и активного доступа к лицензированным диапазонам, когда первичный пользователь отсутствует. Когнитивное радио изучает окружающую радиочастотную среду с помощью зондирования, чтобы обнаружить «белые пятна» – то есть частотные диапазоны, которые временно не используются. Зондирование может осуществляться через маяк первичного пользователя, когнитивный пилот-канал, а также с помощью геолокации и баз данных [8].

Выделяют два основных метода зондирования спектра в когнитивном радио: кооперативный и некооперативный. При некооперативном подходе когнитивные пользователи самостоятельно выявляют активность первичных пользователей. При кооперативном подходе в зондировании участвует сразу несколько когнитивных радиостанций. Они могут взаимодействовать централизованно или распределенно, чтобы определить наличие активности PU. Каждая когнитивная станция передает свои результаты на центральный узел или другим участникам – в зависимости от степени кооперации. Как при кооперативном, так и при некооперативном зондировании в рамках категории переплетения вторичный когнитивный пользователь может применять неиспользуемый лицензированный спектр при отсутствии первичных пользователей. Категория overlay (наложения) спектра поддерживает кооперативную связь, тогда как категория underlay (подстилания) позволяет вторичному пользователю работать параллельно с первичным пользователем без создания помех [9]. Способы зондирования частот проиллюстрированы на Рис. 4.




*Рис. 4*. Подходы, используемые в спектральном зондировании

Таким образом, технология когнитивного радио, основанная на описанных подходах к зондированию спектра и архитектуре когнитивного цикла, представляет собой действенный инструмент для повышения эффективности использования радиочастотного ресурса. Дальнейшее развитие данной области, направлено на совершенствование кооперативных методов зондирования с целью достижения высокой вероятности обнаружения при минимальном уровне ложных тревог в условиях ослабленного сигнала.

## Библиографический список

1. Ian F.Akyildiz, Brandon F.Lo, RavikumarBalakrishnan“Cooperative Spectrum sensing in Cognitive Radio Networks: A Survey”, Physical Communication 4(2011)40-62.

2. J. Mitola and Gerald Q. Maguire. "Cognitive radio: making software radios more personal.", IEEE personal communications ,vol. 6, no. 4,pp. 13-18,1999.

3. S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications." IEEE journal on selected areas in communications, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, 2005.

4. Mikio Hasegawa, Hiroshi Hirai et al “Optimization for Centralized and Decentralized Cognitive Radio Networsks”, Proceedings of the IEEE, Vol.102, No.4, May 2014.S.

5. Niyatisohni, Anand Mane “Spectrum Sensing By Cyclo- Stationary Detector”, Proceedings of IRF International Conference, 13th April 2014, Pune, ISBN 978-93-84209-04-9.
6. YasaswiKolluru and Rayala Ravi Kumar, Cognitive Radio in Public Safety and Emergency Applications, India, 2013
7. W. El-Hajj, H. Safa, and M. Guizani, “Survey of Security Issues in Cognitive Radio Networks,” J. Internet Tech., vol. 12, no. 2, 2011, pp. 25–37.
8. M. Derakhshani and Tho Le-Ngoc. "Aggregate interference and capacity-outage analysis in a cognitive radio network." IEEE Transactions on Vehicular Technology,vol. 61, no. 1, pp. 196-207, 2011.
9. B. Wang and KJ Ray Liu. "Advances in cognitive radio networks: A survey." IEEE Journal of selected topics in signal processing 5, no. 1, pp. 5-23, 2010.

© Дудинов В.Н., 2026

УДК 621.372

Д.А. САДРИЕВ
*Sadriev.54hh@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.З. ТЛЯВЛИН

***Уфимский университет науки и технологий***

## МАКЕТ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

*Аннотация*. В статье рассмотрены вопросы создания макета микрополосковых линий передачи волновым сопротивлением 50 Ом. Изложена структура разработанного макета на базе двухслойной печатной платы, содержащего несколько микрополосковых линий и позволяющего производить измерения собственных параметров линий, а также параметров взаимного влияния.

*Ключевые слова*: микрополосковая линия; печатная плата; волновое сопротивление; взаимные влияния.

В печатном монтаже для передачи сигналов широко используются микрополосковые линии (МПЛ). Для изучения сопутствующих проблем, возникающих при проектировании подобных линий, появилась необходимость разработки экспериментальной лабораторной установки. Была поставлена задача проектирования специализированного макета печатной платы, предназначенного для экспериментальной оценки характеристик линий передачи на частоте $f = 2{,}4$ ГГц. Макет должен быть выполнен в двухслойном исполнении и содержать набор тестовых групп микрополосковых линий с заданным волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом. Топология макета должна обеспечивать варьирование ключевых параметров: длины проводников, ширины дорожек и зазоров между ними. Для получения частных зависимостей

предусматриваются участки с изолированным изменением параметров, а для моделирования ограничений плотного монтажа – зоны с совместным варьированием ширины и зазора. В конструкции необходимо реализовать меры экранирования на основе защитных проводников и массивов сквозных металлизированных отверстий, а также обеспечить размещение высокочастотных разъемов U.FL-R-SMT-1 для подключения измерительного оборудования. Проектирование выполняется в среде EasyEDA с предварительным проведением параметрического расчета геометрии линий и проверкой соответствия топологии заданным требованиям.

Ключевым параметром любой линии передачи является волновое сопротивление ($Z_0$). Для предотвращения отражений сигнала необходимо выполнение условия согласования, при котором волновое сопротивление линии остается постоянным по всей длине и соответствует сопротивлениям источника и нагрузки. Требуемое значение $Z_0$ достигается за счет точного расчета геометрических параметров: ширины проводника, толщины диэлектрика и свойств материалов.

Выбор геометрических параметров проводился итерационным методом, сочетающим аналитический расчет, учет технологических ограничений изготовителя печатных плат и верификацию результатов.

Согласно рекомендациям по конструированию высокочастотных плат, точное значение $\varepsilon_r$ и толщины диэлектрика $h$ зависит от конкретной марки ламината и препрега, имеющихся на складе изготовителя [1]. В качестве базового материала выбран фольгированный стеклотекстолит FR-4. Изготовление платы заказано у отечественного производителя ООО «Резонит».

При проектировании учитывались следующие требования стандартного технологического процесса: минимальная ширина проводника (0,10–0,125 мм); минимальный зазор (0,125 мм); минимальный диаметр сверления (0,2-0,3 мм); толщина платы (1,0 мм – оптимальное решение для задач проекта); толщина медной фольги (0,018 мм; 0,035 мм – доступные значения при выбранной толщине платы); отступ меди от края платы ($\geq 0{,}5$ мм); диэлектрическая проницаемость материала (4,58 – типовое значение изготовителя); допуск на волновое сопротивление (±10%).

Из соображений обеспечения прочности конструкции была выбрана толщина печатной платы 1,0 мм. У изготовителя доступны два варианта толщины медной фольги при заданной толщине платы, а именно: 18 и 35 мкм. Для реализации измерительного макета была выбрана фольга толщиной 35 мкм.

Были проведены расчеты геометрических параметров микрополосковых линий, обусловленных задачами проекта и технологическими ограничениями на разных уровнях (рис. 1).

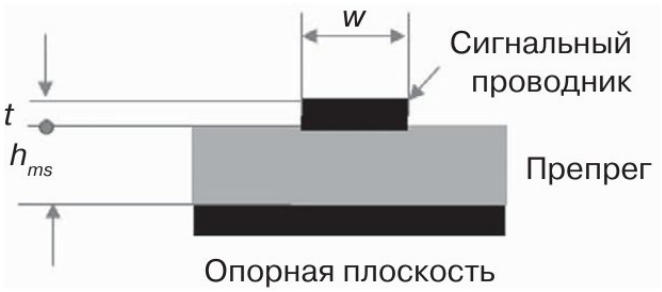



*Рис. 1* Расчетная модель сечения МПЛ

Значение толщины препрега $h_{ms}$ рассчитано исходя из выбранной толщины платы:

$$h_{ms} = 1 - (0{,}035 \cdot 2) = 0{,}93 \text{ мм}.$$

Для расчета волнового сопротивления МПЛ можно воспользоваться приближенными формулами, рекомендованными стандартом IPC:

$$Z_0 = \frac{87{,}5}{\sqrt{\varepsilon_r + 1{,}41}} \cdot \ln\left(\frac{5{,}98 \cdot h_{ms}}{0{,}8w + t}\right),$$

где $\varepsilon_r$ − относительная диэлектрическая проницаемость ламината; $h_{ms}$ − толщина диэлектрика ламината, мм; $w$ − ширина проводника, мм; $t$ − толщина проводника, мм. Результат справедлив при $1 < \varepsilon_r < 15$ и $0{,}1 < w/h_{ms} < 3$.

Выразим ширину проводника $w$ из расчетной формулы волнового сопротивления:

$$w = 7{,}475 \cdot h_{ms} \cdot \exp\left(-\frac{Z_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_r + 1{,}41}}{87{,}5}\right) - 1{,}25 \cdot t.$$

Учитывая заранее подобранные параметры: $Z_0 = 50$ Ом; $\varepsilon_r = 4{,}58$; $t = 0{,}035$ мм; $h_{ms} = 0{,}93$ мм, получим номинальное значение $w = 1{,}67$ мм.

На рабочей частоте $f$ геометрические размеры проводников становятся соизмеримыми с длиной волны сигнала.

Эффективная диэлектрическая проницаемость [2] определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 12\frac{h_{ms}}{w}\right)^{-1/2},$$

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{4{,}58 + 1}{2} + \frac{4{,}58 - 1}{2}\left(1 + 12\frac{0{,}93}{1{,}67}\right)^{-1/2} \approx 3{,}44.$$

Длина волны в свободном пространстве составляет:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2{,}4 \cdot 10^9} = 0{,}125 \text{ м} = 125 \text{ мм}.$$

С учетом эффективной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{\text{eff}} \approx 3{,}44$) длина волны в линии передачи равна:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} = \frac{125}{1{,}85} \approx 67{,}6 \text{ мм}.$$

В макете реализованы тестовые площадки с длинами, кратными характерным значениям $\lambda_g$:

$$l = \lambda_g \approx 67{,}6 \text{ мм},$$
$$l = \lambda_g/2 \approx 33{,}8 \text{ мм},$$
$$l = \lambda_g/4 \approx 16{,}9 \text{ мм}.$$

Аналогичным образом выполняется расчет характерных длин для значений ширины $w = 1{,}5$ мм и $w = 1{,}8$ мм.

Исходя из номинального значения ширины проводника w, методом параметрического анализа подобраны дополнительные тестовые значения $w = 1{,}5$ мм и $w = 1{,}8$ мм, обеспечивающие волновые сопротивления $Z_0 = 53{,}8$ Ом и $Z_0 = 47{,}4$ Ом соответственно. Данные значения находятся в пределах технологического допуска $\pm 10\%$.

Для экспериментальной оценки взаимного влияния параллельных микрополосковых линий на макете реализован набор тестовых площадок с варьируемым зазором $s$. Диапазон варьирования выбран исходя из конструктивных ограничений и необходимости охвата характерных режимов связи.

Макет содержит 9 различных вариантов пар микрополосковых линий (площадок), геометрические параметры которых приведены в таблице 1.

*Таблица 1*

Геометрические параметры МПЛ

| № площадки | 1-1 | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 | 1-7 | 1-8 | 1-9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $l$, мм | 67,6 | 33,8 | 16,9 | 17 | 16,9 | 16,9 | 16,9 | 16,9 | 16,9 |
| $w$, мм | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,5 | 1,67 | 1,8 | 1,67 | 1,67 | 1,67 |
| $s$, мм | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,67 | 1,5 | 1,37 | 1,5 | 1,75 | 2 |

Тестовые площадки разделены заземленными экранирующими линиями, выполненными в виде медных дорожек с переходными отверстиями, соединяющими их со сплошным полигоном нижнего слоя (рис. 2, 3). Такая структура формирует экран, снижающий взаимное влияние тестовых структур за счет разрыва электромагнитного поля и уменьшения перекрестных помех.

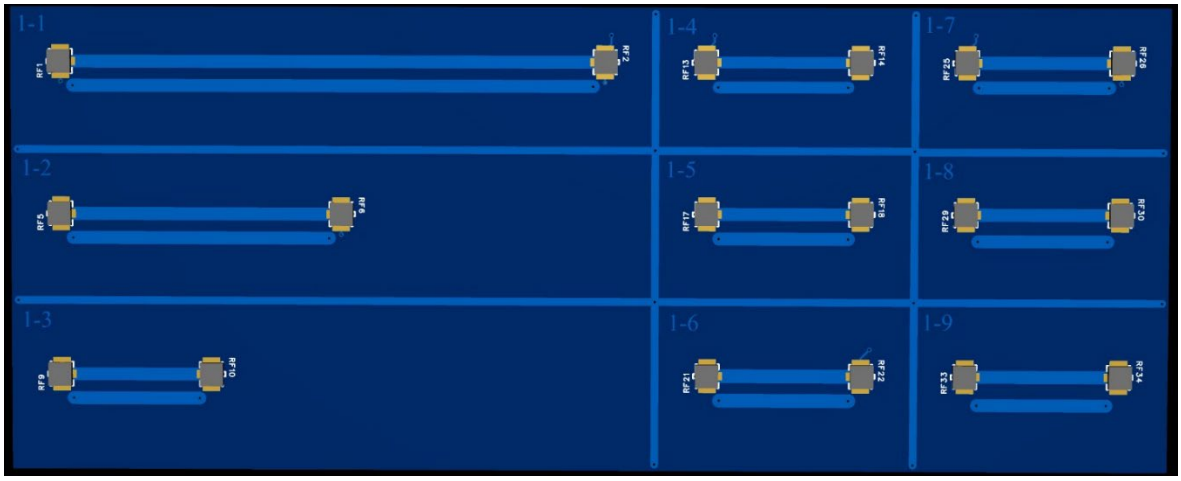



*Рис. 2.* Трехмерное изображение верхнего слоя макета

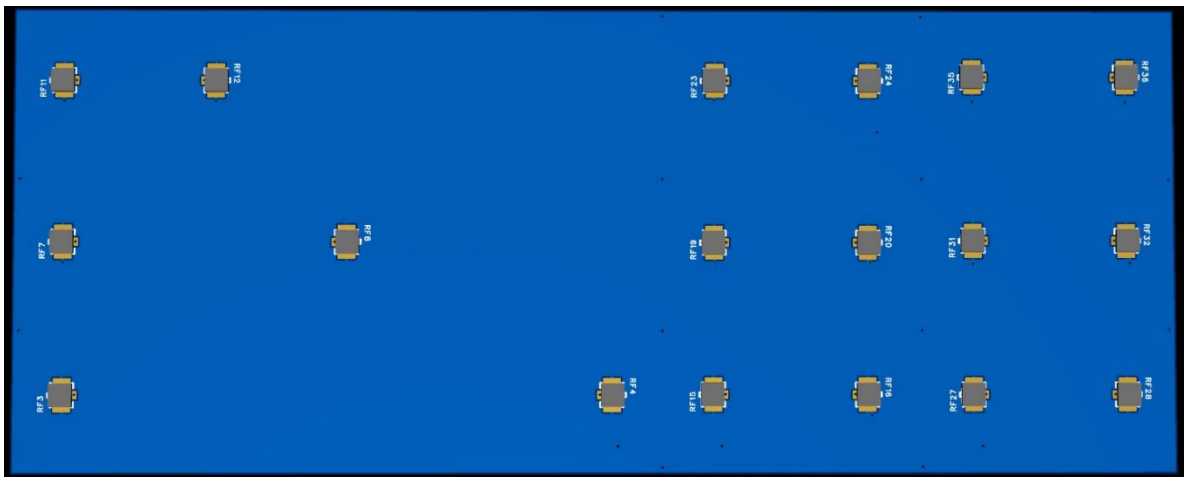


*Рис. 3.* Трехмерное изображение нижнего слоя макета

Исходя из того, что габариты корпусов разъемов ограничивали минимально возможный зазор между МПЛ, их пришлось располагать с двух сторон, чтобы максимально приблизить сигнальные проводники микрополосковых линий друг к другу.

Разработанный макет позволит проводить измерения собственных параметров микрополосковых линий (волновое сопротивление, коэффициент стоячей волны (КСВ) и S-параметры), а также параметров взаимного влияния и может быть использован, как в образовательном процессе, так и в научных исследованиях.

## Библиографический список

1. Кечиев Л.Н. Практическое руководство по конструированию многослойных печатных плат. Инженерное пособие / Л.Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2021. – 416 с.

2. Hammerstad E., Jensen O. Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design // 1980 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 1980. – С. 407–409.

© Садриев Д.А., 2026

УДК 681.5

А.М. ИВАНОВ
ival200312@gmail.com
Науч. руковод. – доцент И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

*Аннотация.* В данной работе описана практическая реализация недорогой, открытой и масштабируемой системы автоматического управления движением маломерного судна (катера, лодки). Система построена на одноплатном компьютере Orange Pi 5 и беспроводных модулях ESP32, взаимодействующих по протоколу MQTT поверх Wi-Fi. Она интегрирует данные GPS, инерциального измерительного модуля (IMU) и эхолота, а также обеспечивает управление электромотором постоянного тока с обратной связью по току и напряжению. Представлены архитектура, выбор компонентов, схемы подключения, программное обеспечение и результаты натурных испытаний. Особое внимание уделено применению системы в любительском и профессиональном рыболовстве.

*Ключевые слова*: автопилот, маломерное судно, Orange Pi, ESP32, MQTT, GPS, IMU, эхолот, управление мотором, рыболовство.

В последние годы наблюдается активное развитие маломерного флота — прогулочных катеров, лодок для рыбной ловли, катамаранов. Владельцы таких судов все чаще задумываются об автоматизации управления: удержании курса, автоматическом следовании по маршруту, контроле глубины. Однако коммерческие автопилоты имеют два существенных недостатка: высокая стоимость и закрытая архитектура, не позволяющая пользователю модифицировать систему или интегрировать нештатные датчики.

С другой стороны, бурное развитие одноплатных компьютеров Orange Pi и микроконтроллеров ESP32 предоставило возможность создания недорогих и гибких систем «с нуля». В интернете существует множество разрозненных проектов, но они либо ориентированы на беспилотные летательные аппараты, либо требуют глубоких знаний в области программирования и схемотехники. Кроме того, редко встречаются законченные решения, учитывающие суровые условия эксплуатации на воде: влажность, вибрацию, импульсные помехи в бортовой сети.

Данный проект направлен на создание доступной, надежной и документированной системы автоматического управления движением

маломерного судна, которая могла бы использоваться как рыбаками-любителями, так и профессионалами, а также другим пользователям.

Для создания успешно работающей системы необходимо будет решить следующие задачи: 1) Анализ существующих решений и выявление недостатков. 2) Разработка общей архитектуры системы. 3) Выбор аппаратных компонентов. 4) Создание схем подключения всех узлов. 5) Реализация программного обеспечения для всех компонентов.

В основе системы лежит бортовой управляющий модуль, создающий на лодке собственную локальную беспроводную сеть. К нему напрямую подключены навигационные датчики: приемник GPS задает координаты и скорость движения, а инерциальный модуль (IMU) непрерывно отслеживает пространственное положение судна – курс, крен и тангаж. Остальное оборудование взаимодействует с центральным модулем по Wi‑Fi, формируя общую информационную среду на борту.

Эхолот, штатно оснащенный только проводным USB‑интерфейсом, подключается к компактному беспроводному шлюзу. Этот шлюз считывает данные с эхолота, преобразует их в цифровые сообщения и передает по радиоканалу на центральный модуль. В результате информация о глубине под килем попадает в систему без необходимости прокладывать дополнительные кабели.

Система управления двигателем организована по схожей схеме. Двигатель связан с силовым драйвером, а тот принимает управляющие команды от отдельного беспроводного модуля, включенного в ту же бортовую сеть. Этот модуль принимает по Wi-Fi от центрального блока значения необходимой скорости и направления вращения и преобразует их в электрические сигналы, которые заставляют мотор вращаться в нужную сторону с требуемой мощностью. Одновременно тот же модуль измеряет реальный ток, потребляемый мотором, и напряжение аккумулятора, и отправляет эти данные обратно на центральный блок.

Центральный модуль непрерывно обрабатывает всю поступающую информацию: координаты, курс, глубину, ток и напряжение. В него заложены алгоритмы автоматического управления (так называемые ПИД-регуляторы), которые сравнивают текущее состояние лодки с желаемым (например, заданный курс или минимальная глубина) и вычисляют, с какой силой и в какую сторону нужно вращать мотор, чтобы устранить отклонение. Эти команды отправляются по Wi-Fi на модуль управления двигателем, и цикл замыкается.

Для взаимодействия оператора с системой центральный модуль создает веб-страницу, доступную по локальной сети с любого ноутбука, планшета или смартфона. На этой странице отображаются все данные в реальном времени — положение лодки на карте, курс, глубина, состояние двигателя и батареи. Через ту же страницу можно задать целевой курс, активировать автоматическое удержание над точкой, запустить следование по записанному маршруту или отдать команду аварийной остановки.

Таким образом, система объединяет разнородные датчики и исполнительные устройства в единый информационно-управляющий контур, берет на себя рутинные задачи удержания направления и глубины, а оператору предоставляет удобный пульт управления и полную картину происходящего. При этом связь между блоками — беспроводная, что упрощает монтаж на лодке и позволяет гибко добавлять новые устройства.

В системе будут использоваться следующие ключевые компоненты: центральный контроллер Orange Pi 5 (создает Wi-Fi сеть, MQTT-брокер, веб-сервер, реализует ПИД-регуляторы); GPS NEO-M8N для определения координат, скорости и курса; IMU BNO055 для измерения ориентации (курс, крен, тангаж); аварийная кнопка, подключенная к GPIO, для мгновенной остановки; на базе ESP32 DevKit V1 построены беспроводные модули: один с конвертером CP2102 читает глубину с эхолота (NMEA 0183) и передает по MQTT, другой через оптопары 4N35 управляет драйвером мотора Cytron MD30C (режим PWM/DIR), получает данные с датчика тока ACS712 30A и делителя напряжения 0-25В; все модули питаются через DC-DC 12→5В (LM2596) и защищены предохранителями, диодами Шоттки (от переполюсовки) и TVS-диодами (от импульсных скачков); для влагозащиты используются корпуса IP67, а для устойчивой связи – внешние Wi-Fi антенны.

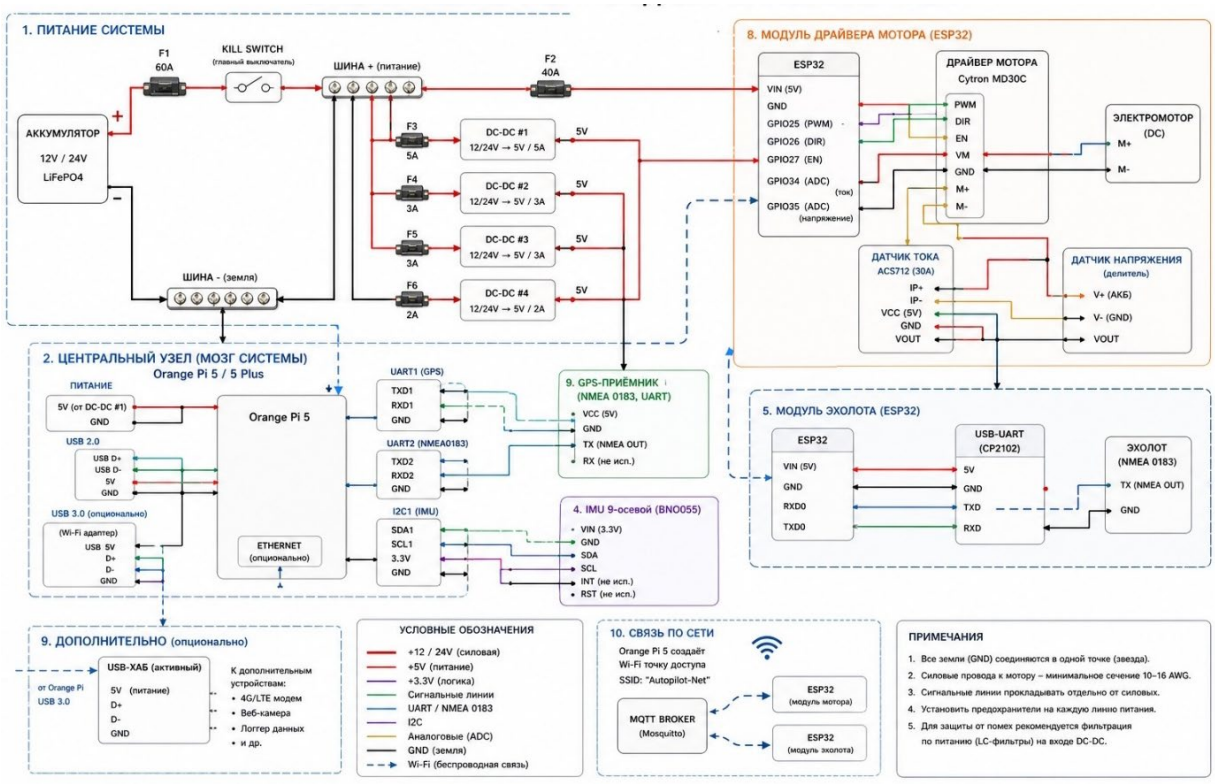



*Рис. 1 - Схема подключения всей системы*

В результате проектирование была создана системы передачи данных для автоматизированного передвижения маломерных судов на основе данных позиционирования. Комплекс имеет невысокую стоимость, собран из доступных элементов, работает без перебоев и в штатном режиме. При

появлении помех или аварийных ситуациях, система автономно исправляет ошибки и отображает решение у оператора.

**Библиографический список**

1. Борисова Л.Ф., Морозов Н.Н., Стариченков А.Л. Архитектура системы беспроводного доступа для системы управления движением маломерных плавательных средств в районе морского порта // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 18–23.

2. Оськин Д.А., Горшков А.А., Клименко С.А., Погодин Н.А. Информационно-управляющая система сбора и передачи информации для безэкипажного судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2021. – № 2. – С. 24–31. – DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-24-31.

3. Пшихопов В.Х., Гуренко Б.В., Назаркин А.С. Реализация и экспериментальное исследование микроконтроллерного блока управления исполнительными механизмами автономного надводного мини-корабля «Нептун» // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 5. – С. 213–218.

© Иванов А.М., 2026

УДК 004.89:656.61.052

Р.Р. ШАГИАХМЕТОВ
*shagiahmetov-radmir@mail.ru*
Науч. руководитель – доцент И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ И ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 100 ДО 1500 МГЦ

*Аннотация*. В данной работе рассматривается разработка доступного аппаратно-программного комплекса радиомониторинга и пеленгации источников радиоизлучения на базе технологии Software Defined Radio. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания недорогих и автоматизированных средств защиты от утечки информации по радиоканалу для локальных объектов.

*Ключевые слова*: радиомониторинг, пеленгация, Software Defined Radio, SDR, электромагнитная обстановка, обнаружение сигналов, одноплатный компьютер.

Современный этап развития информационных технологий характеризуется стремительным ростом числа устройств, использующих радиочастотный спектр. Сети сотовой связи, точки беспроводного доступа, устройства интернета вещей формируют в городских условиях чрезвычайно плотную электромагнитную среду. Эта насыщенность создает благоприятные условия для маскировки несанкционированных источников радиоизлучения - так называемых закладных устройств. Подобные устройства используют методы расширения спектра, псевдослучайную перестройку рабочей частоты и передачу данных короткими пакетами, что делает традиционные разовые проверки помещений индикаторами поля практически неэффективными.

В ходе анализа предметной области была выявлена проблема: профессиональные комплексы радиомониторинга и пеленгации, такие как продукты ведущих зарубежных и отечественных производителей, обладают высокими техническими характеристиками, однако их стоимость делает их недоступными для оснащения широкого круга локальных объектов. Существующие открытые проекты на базе технологии Software Defined Radio, в свою очередь, предлагают лишь фрагментарные решения: визуализацию спектра, декодирование отдельных протоколов, запись сигналов. Они не образуют единой системы автоматизированного обнаружения и не предоставляют законченного инструмента для оперативного персонала.

В связи с этим была сформулирована научно-техническая задача: разработать аппаратно-программный комплекс радиомониторинга, обеспечивающий непрерывное сканирование заданного диапазона частот, автоматическое обнаружение сигналов на основе системы триггеров, амплитудную пеленгацию источников излучения и визуализацию результатов через веб-интерфейс. При этом система должна оставаться доступной по стоимости и пригодной для самостоятельной сборки и настройки.

В качестве приемного узла комплекса используется программно-определяемый радиоприемник бюджетного сегмента, подключаемый по шине USB. Вычислительным ядром служит одноплатный компьютер под управлением операционной системы Linux, что обеспечивает доступ ко всем необходимым программным библиотекам для обработки сигналов и организации сетевого взаимодействия.

Для реализации амплитудного метода пеленгации применяется двухантенная конфигурация: одна антенна с круговой диаграммой направленности используется для панорамного обзора и обнаружения сигналов, вторая, обладающая выраженными направленными свойствами, - для определения сектора, из которого приходит излучение. Такой подход позволяет реализовать базовую функцию пеленгации при использовании одного приемного канала, что является наиболее бюджетным решением для задачи поиска источника в пределах помещения.

Разработанный комплекс представляет собой централизованный аппаратно-программный узел с заложенной возможностью масштабирования

до сети из нескольких аналогичных постов, объединенных общим сервером-агрегатором. Общая структурная схема комплекса приведена на рисунке 1.




*Рисунок 11 – Структурная схема комплекса*

Сигнал от антенны поступает на вход SDR-приемника, где оцифровывается. Цифровой поток IQ-отсчетов передается в одноплатный компьютер, где на уровне программного обеспечения на языке Python выполняются все основные процессы: пошаговое сканирование частотного диапазона, вычисление спектра посредством быстрого преобразования Фурье, реализация алгоритмов автоматического обнаружения и первичный расчет пеленга. Итоговая информация об обнаруженных частотах, их уровнях и секторах излучения становится доступна оператору через веб-интерфейс, развернутый непосредственно на том же одноплатном компьютере. Оператор может подключиться к системе с любого устройства в локальной сети через обычный браузер.

Программное обеспечение комплекса построено по модульному принципу. Выделены независимые функциональные блоки: модуль управления приемником, отвечающий за настройку частоты и получение данных, модуль анализа, реализующий логику обнаружения и классификации сигналов, модуль хранения, обеспечивающий ведение базы данных белого списка частот, истории сканирования и зафиксированных аномалий, а также веб-сервер, обрабатывающий запросы от интерфейса оператора.

Система автоматического обнаружения сигналов основана на комбинации нескольких типов триггеров, что позволяет эффективно отсеивать случайные помехи и фокусировать внимание оператора на действительно подозрительных событиях. Адаптивный пороговый триггер сравнивает текущий уровень сигнала с динамически вычисляемым порогом, определяемым на основе медианного уровня шума. Триггер обнаружения новых частот сверяет каждое зафиксированное излучение с заранее сформированным белым списком

легальных передатчиков. Триггер контроля тихих зон позволяет задавать диапазоны частот, которые в нормальных условиях должны быть свободны от излучений. Детектор периодичности анализирует временной лог появления сигнала и выявляет повторяющиеся паттерны, характерные для работы автоматических цифровых передатчиков.

В ходе отладки экспериментального макета был выявлен и решен ряд практических проблем, характерных для бюджетного сегмента SDR-устройств. Обнаружена нестабильность канала связи с приемником при длительной непрерывной работе, потребовавшая реализации программной логики автоматического переподключения. Проведена эмпирическая калибровка порога чувствительности на основе измерений уровня собственных шумов тракта и внешнего электромагнитного фона в типовом помещении.

Выполненные инженерные расчеты подтвердили соответствие характеристик макета поставленным требованиям. Энергетический расчет показал, что система способна обнаруживать типовой маломощный передатчик на расстояниях, превышающих размеры стандартного офисного помещения. Оценка времени полного цикла сканирования показала, что оно составляет порядка нескольких минут, что обеспечивает высокую вероятность обнаружения даже кратковременных пакетных передач. Экспериментальная проверка параметров фидерного тракта подтвердила корректность принятых при проектировании решений.

Научная новизна работы заключается в создании интегрированной аппаратно-программной системы, реализующей полный цикл радиомониторинга - от сканирования спектра до амплитудной пеленгации - исключительно на базе общедоступных недорогих компонентов, с применением комбинированной многокритериальной системы триггеров для автоматического обнаружения и классификации сигналов. В отличие от существующих открытых решений, которые реализуют лишь отдельные функции и требуют высокой технической квалификации пользователя, предложенный комплекс предоставляет законченный инструмент с веб-интерфейсом, ориентированным на конечного пользователя - сотрудника службы безопасности, не обладающего углубленными знаниями в радиоэлектронике.

Практическая значимость работы определяется широким спектром потенциальных применений разработанного комплекса. Он может использоваться в переговорных комнатах, кабинетах руководителей и режимных помещениях предприятий для непрерывного контроля радиоэфира и предотвращения утечки информации по радиоканалу. Кроме того, комплекс применим для поиска источников непреднамеренных электромагнитных помех и в образовательных целях - при изучении технологий программно-определяемого радио и методов цифровой обработки сигналов. Использование доступных компонентов позволяет существенно снизить затраты на оснащение объектов, а модульная архитектура программного обеспечения обеспечивает

возможность дальнейшего расширения функциональности без перепроектирования всей системы.

В заключение можно отметить, что в ходе работы был разработан функционирующий макет аппаратно-программного комплекса радиомониторинга и пеленгации, обеспечивающий решение поставленных задач. Полученные результаты подтверждают перспективность подхода, основанного на применении технологий программно-определяемого радио в сочетании с доступной элементной базой, для создания эффективных и экономичных средств контроля электромагнитной обстановки.

**Библиографический список**

1. Федеральный закон от 07.07.2003 № 126-ФЗ «О связи».

2. Овчаренко Н.И., Косичкина Т.П. Основы построения систем радиомониторинга. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 312 с.

3. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. М.: Стандартинформ, 2007. 7 с.

4. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 640 с.

© Шагиахметов Р.Р., 2026

УДК 629.5.05

Э.Р. БАЙБУРИН
*15052003@mail.ru*
Науч. руководитель – доцент И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## РАЗРАБОТКА МАГНИТНОГО КОМПАСА С ПРИЕМНИКОМ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ

*Аннотация*. В данной работе рассматривается разработка цифрового магнитного компаса с приемником навигационных сигналов для позиционирования маломерных судов на воде. Устройство будет собрано на базе ESP32-S3. Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения точных координат при нахождении судна на воде.

*Ключевые слова*: навигация, ESP32-S3, NEO-M8N, магнитный компас.

Современные маломерные судна оснащаются все более сложными элементами для более комфортного нахождения на воде. Используются

различного вида эхолоты, картплоттеры, автопилоты. Все эти системы напрямую завязаны с позиционированием судна на воде, им нужны точные координаты. Обычный магнитный компас обладает большим недостатком, его невозможно интегрировать в различные электронные системы судна.

Решением этой проблемы может являться разработка цифрового магнитного компаса, который будет сопрягаться с этими системами, уточнять данные для позиционирования, и помогать точной навигации судна. Применение глобальных навигационных систем в сочетании с возможностью соединения с другими системами судна позволяет компенсировать недостатки обычного магнитного компаса.

Целью моей работы является разработка и исследование универсального цифрового магнитного компаса со встроенным приемником GNSS сигнала для определения курса маломерных судов. Устройство должно обеспечивать передачу координат, а также работать с эхолотами, которым нужные точные данные о местоположении на воде.

Для создания успешно работающего устройства необходимо будет решить следующие задачи:

1) выполнить анализ современных методов решения позиционирования судна на воде, поиск различных аналогов;

2) разработать устройство и подобрать все нужные компоненты;

3) провести математические расчеты, чтобы убедиться в совместимости компонентов;

4) собрать устройство и провести калибровку всех систем;

5) провести экспериментальные исследования с помощью прототипа будущего устройства.

Обычные приемники GPS сигнала обычно уже интегрированы в эхолоты, но есть проблема. Датчики эхолота находятся в воде или за бортом, в то время как сам эхолот устанавливается на борту лодки. Без коррекции картплоттер передает данные о том, что лодка находится там, где находится приемник сигнала (под водой), а это расстояние может достигать до 2–3 метров, вследствие чего все реальные точки будут смещены на карте относительно их реального положения. К тому же существует проблема стояния на точке. Когда лодка стоит на якоре и крутится на месте под воздействием ветра и течения датчик GPS не имеющий встроенного компаса теряет правильное направление курса. По итогу правый борт на карте может отмечаться как левый, а левый – как правый. При помощи создания магнитного компаса с приемником GNSS все эти проблемы можно решить.

Помимо коррекции точных координат на воде можно интегрировать следующие функции:

1. Режим кормы. Благодаря встроенному компасу можно отображать не только направление носа лодки, но и положение ее кормы. Это помогает точно встать на точку и удержать нужные данные на течении и при сильном ветре;

2. Удобная настройка по Wi-Fi. Устройство можно будет полностью настроить путем использования беспроводной связи с помощью телефона.

Показания прибора могут искажаться под влиянием твердого и мягкого железа. Твердое железо создается постоянными магнитами и намагниченными деталями, такими как двигатели. Мягкое железо обладает индуктивным магнетизмом, зависящим от положения корпуса судна относительно магнитного меридиана. После вычисления магнитного курса и введения поправки на девиацию необходимо добавить магнитное склонение, которое показывает истинный курс судна точка. Также необходимо учитывать показания магнитного склонения и наклонения. Магнитное склонение — это угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности. Оно показывает отличие между показаниями магнитного компаса с истинным направлением на север в данной точке в данный момент времени. Магнитное склонение будет считаться положительным если северный конец магнитной стрелки компаса отклонен к востоку от географического меридиана, если он будет отклонен к западу, то значение будет считаться отрицательным. Значение магнитного склонения указывается на магнитных картах и используется для определения истинного меридиана по показанию магнитного компаса, оно также изменяется во времени из-за положения геомагнитных полюсов, который изменяют свое положение со временем. Северный магнитный полюс смещается ежегодно на 50–60 километров. Например, если магнитное склонение составляет 10 градусов к востоку, то компас покажет ошибочное значение на 10 градусов вправо от верного.

Магнитное наклонение — это угол между горизонтальной плоскостью и направление магнитной стрелки, подвешенной на горизонтальной оси. Оно показывает, насколько стрелка под воздействием магнитного поля отклоняется от вертикальной поверхности.

Магнитное наклонение будет считаться положительным, когда северный конец стрелки смотрит вниз, если же северный конец будет направлен вверх, то магнитное наклонение принимает отрицательные значения. Вблизи экватора наклонение близко к нулю, но при движении к полюсам угол наклона увеличивается, достигая 90 градусов на магнитных полюсах. В северном полушарии указывающий на север конец стрелки отклоняется вниз, а в южном – вверх. Точки на земной поверхности, при которой стрелка будет вертикальна, соответственно угол магнитного наклонения будет равен 90 градусов называются магнитными полюсами земли, если значение наклонение будет равно 0 градусов и стрелку горизонтальна, то такая линия будет называться магнитным экватором.

Все вышеперечисленное означает что для успешной разработки цифрового магнитного цифрового компаса необходимы будут необходимы следующие компоненты:

1) магнитометр, который позволит измерять проекции магнитного поля земли и вычислять магнитный курс для получения истинного курса судна;

2) акселерометр, который измеряет углы наклона и компенсирует их влияние на показание магнитометра при качке;

3) гироскоп, который измеряет угловую скорость и позволяет сглаживать рывки, что позволит обеспечивать устойчивость курса в динамике;

4) приемник GNSS, который позволит определять точные координата судна в пространстве.

При подборе компонентов для цифрового магнитного компаса был произведен анализ и сравнение существующих на рынке вариантов, подходящих для реализации.

В качестве основы системы был выбран микроконтроллер ESP32-S3, который имеет встроенный модуль Wi-Fi, нужный для передачи данных с компаса на эхолот. Датчик ICM-20948, который сочетает в себе 3-осевой гироскоп, 3-осевой акселерометр, 3-осевой магнитометр, имеет высокую точность и низкое электропотребление. Модуль навигации NEO-M8N, который поддерживает многие системы навигации, такие как: ГЛОНАСС, Galileo, BeiDuo, GPS. На рис. 1 представлена схема соединения этих модулей.

Данный выбор компонентов сочетает в себе высокую точность данных при их низкой стоимости.

Программная составляющая устройства будет реализована в среде Arduino IDE. Большое количество встроенных и проверенных библиотек для датчиков позволит сократить время разработки устройства и увеличить стабильность. Среда Arduino имеет оптимальное сочетание функциональности и доступность для создание цифрового компаса.

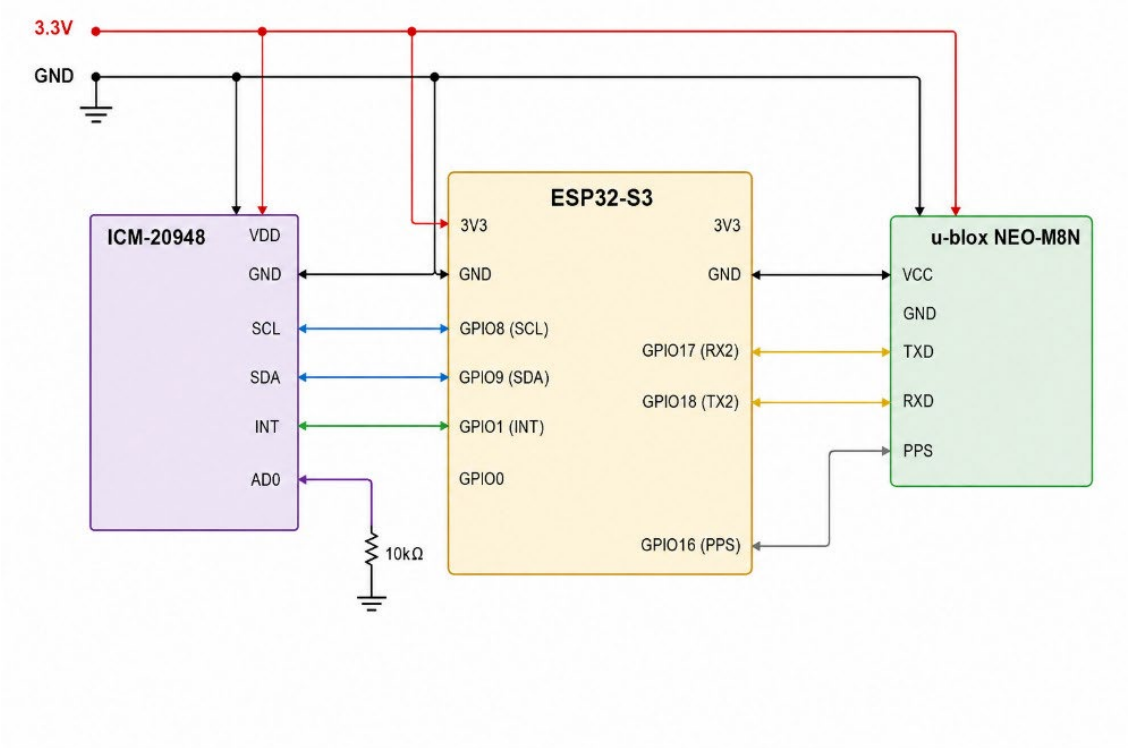



*Рис. 1.* Схема соединения основных модулей

Устройство работает следующим образом: микроконтроллер ESP32-S3 непрерывно получает данные с датчика ICM-20948 и NEO-M9N, далее по

полученным данным акселерометра и гироскопа компенсируется наклон, а магнитометр дает верный курс, GNSS дает координаты. Данные калибруются и передаются на подключенное по Wi-Fi устройство.

В результате проектирование был создан цифровой магнитный компас с приемником GNSS сигнала для позиционирования маломерных судов. Компас имеет невысокую цену и собран из доступных элементов, но при этом имеет высокую точность и калибровку данных, которые могут возникать из-за различных помех.

**Библиографический список**

1. Воронов В. В. Магнитные компасы, теория, конструкция и девиационные работы / В. В. Воронов, Н. Н. Григорьев, А. В. Яловенко. - СПб : Элмор, 2004. -192 с.

2. Лукомский Ю. А. Навигация и управление движением судов : учеб / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А . Скороходов. - СПб : Элмор, 2002. —360 с.

3. Михаил Русских. Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок / Михаил Русских // Журнал РАДИОЛОЦМАН. - 2012. - сентябрь 2012. -С. 31-38.

© Байбурин Э.Р., 2026

УДК 004.852:519.234

Н.С. ОЛЬКОВА, Д.С. НЕФЕДОВА
*natalaolkova5@gmail.com*
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент В.В. ИВАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ВЕРИФИКАЦИЯ ГЛАДКОСТИ И МАЛОШУМНОСТИ ПРОСТРАНСТВА ПОЛИТИК АУГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Аннотация*. В работе проводится верификация ключевого допущения байесовской оптимизации политик аугментации: достаточной гладкости и низкого шума функции вознаграждения $R(\pi)$. На основе трёхуровневого протокола разбивки данных и символьных вычислений подтверждается, что медианный коэффициент вариации не превышает 0.017, а локальные отношения Липшица существенно ниже теоретических границ, что создаёт математически обоснованный фундамент для построения суррогатной модели.

*Ключевые слова*: аугментация данных, политика аугментации, функция Липшица, коэффициент вариации, малые выборки, верификация гладкости, байесовская оптимизация.

## 1. Введение

Прогресс методов глубокого обучения в компьютерном зрении исторически опирался на доступность масштабных размеченных датасетов. Однако значительный класс прикладных задач — медицинская диагностика по рентгеновским и гистологическим снимкам, дефектоскопия в промышленности, агрономический мониторинг — характеризуется принципиальной малостью обучающей выборки. Разметка таких данных требует участия высококвалифицированных экспертов, а сами наблюдения редки по своей природе. В этих условиях аугментация изображений выступает одним из немногих доступных инструментов регуляризации, а качество выбранной политики аугментации напрямую определяет итоговые метрики модели.

Автоматический поиск оптимальной политики впервые был формализован в рамках метода AutoAugment, где контроллер на основе рекуррентной нейронной сети обучался посредством обучения с подкреплением. Несмотря на доказанную эффективность на бенчмарках CIFAR-10 и ImageNet, данный подход требует порядка 5000 GPU-часов, что делает его неприменимым в условиях ограниченных вычислительных бюджетов. Последующие методы (RandAugment, Population Based Augmentation, Fast AutoAugment) частично снижают затраты, но либо жертвуют доменной специфичностью, либо остаются ориентированными на большие наборы данных.

Принципиально альтернативным направлением выступает байесовская оптимизация (Bayesian Optimization, BO), обеспечивающая субоптимальный поиск при числе оценок целевой функции на порядки меньшем, чем у перебора или RL-подходов. Однако математическая корректность всей конструкции BO опирается на строгое предположение: функция вознаграждения $R(\pi)$в пространстве политик должна быть достаточно гладкой и малошумной. Если ландшафт сильно изрезан или доминирует стохастический разброс оценок, гауссовский суррогат теряет предсказательную силу, а стратегия exploration-exploitation вырождается.

Целью настоящей части работы является численная и аналитическая верификация указанного предположения. Мы формализуем пространство политик, выводим необходимые условия гладкости, разрабатываем протокол экспериментальной проверки и демонстрируем, что реальный ландшафт вознаграждения удовлетворяет требованиям, предъявляемым к задачам суррогатной оптимизации.

## 2. Формализация пространства политик и функции вознаграждения

Пусть задано множество допустимых трансформаций изображения $\mathcal{T} = \{T_1, \dots, T_K\}$, где каждая трансформация $T_k$характеризуется двумя параметрами: вероятностью применения $p_k \in [0,1]$и интенсивностью (magnitude) $m_k \in [0,1]$. Политика аугментации определяется как вектор параметров:

$$\pi = (p_1, m_1, \dots, p_K, m_K) \in \Pi \subset [0,1]^{2K}, \quad (1)$$

где П— компактное подмножество единичного гиперкуба размерности $d = 2K$. В настоящем исследовании зафиксировано $K = 8$трансформаций (поворот, горизонтальное и вертикальное отражение, изменение яркости, контраста, гамма-коррекция, добавление шума, размытие), что соответствует 16-мерному пространству политик.

Для модели $f_\theta$, обученной с политикой аугментации $\pi$на обучающей выборке $\mathcal{D}_{train}$, функция вознаграждения определяется как средняя метрика качества на валидационном множестве:

$$R(\pi) = \mathbb{E}_{\mathcal{D}_{val}}[\mathcal{M}(f_\theta(\pi; \mathcal{D}_{train}), \mathcal{D}_{val})]. \quad (2)$$

Ввиду стохастичности процедуры обучения (инициализация весов, порядок батчей, dropout) $R(\pi)$является случайной величиной при фиксированном $\pi$. Реализации при различных случайных семенах обозначаются как $R^{(s)}(\pi)$, $s \in \{1, \dots, S\}$, а усреднённая оценка вычисляется как:

$$\hat{R}(\pi) = \frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S} R^{(s)}(\pi). \quad (3)$$

Компактность области Пи непрерывность параметров гарантируют, что при выполнении условий регулярности функция $R(\pi)$допускает локальную аппроксимацию, что является необходимым условием для применения методов глобальной оптимизации.

**3. Ключевые гипотезы применимости байесовской оптимизации**

Для обоснования корректности замены дорогостоящей оценки $\hat{R}(\pi)$гауссовским суррогатом формулируются две базовые гипотезы.

**Гипотеза H1 (Липшицевость).** Функция $R(\pi)$является Липшицевой на Пс константой $L > 0$:

$$\| R(\pi_1) - R(\pi_2) \| \leq L \| \pi_1 - \pi_2 \|, \forall \pi_1, \pi_2 \in \Pi. \quad (4)$$

Данное условие гарантирует отсутствие бесконечных градиентов и «разрывов» ландшафта, что необходимо для сходимости методов, опирающихся на локальную информацию о функции.

**Гипотеза H2 (Малый шум оценки).** Коэффициент вариации вознаграждения при фиксированной политике ограничен:

$$\mathrm{CV}(\pi) = \frac{\sigma\left(R^{(s)}(\pi)\right)}{\mathbb{E}\left[R^{(s)}(\pi)\right]} \leq \tau, \tau = 0.05. \quad (5)$$

Порог $\tau = 0.05$обеспечивает статистическую различимость политик с разницей качества $\Delta R \approx 0.05$на уровне надёжности, достаточном для работы acquisition-функций. Превышение данного порога привело бы к тому, что стохастический разброс оценок затмил бы межполитиковую дисперсию, сделав поиск бессмысленным.

**4. Методология численной верификации**

Для исключения систематической утечки данных (data leakage) применяется трёхуровневая схема разбивки датасета. Обучающая выборка

$\mathcal{D}_{train}$(60% данных) используется исключительно для обучения модели при оценке каждой политики. Поисковая валидационная выборка $\mathcal{D}_{search}$(20%) служит источником сигнала вознаграждения $\hat{R}(\pi)$в процессе анализа. Контрольная тестовая выборка $\mathcal{D}_{test}$(20%) изолирована и не участвует в текущей части исследования.

На начальном этапе верификации применяется синтетическая тест-функция, аппроксимирующая структуру реального ландшафта:

$$f(x,y) = \frac{x^2}{10} + \sin(\pi x)\cos\left(\frac{\pi y}{2}\right), (x,y) \in [-2,2]^2. \quad (6)$$

Функция обладает известной аналитической структурой, что позволяет верифицировать численные оценки константы Липшица через символьные вычисления. Квадрат нормы градиента вычисляется аналитически:

$$\| \nabla f \|^2 = \left(\frac{x}{5} + \pi\cos(\pi x)\cos\left(\frac{\pi y}{2}\right)\right)^2 + \left(-\frac{\pi}{2}\sin(\pi x)\sin\left(\frac{\pi y}{2}\right)\right)^2. \quad (7)$$

Символьная верификация в системе SymPy подтверждает тождественность выражения (корректность возвращает разность, равную 0). Численная оценка по равномерной сетке даёт $\sup \| \nabla f \| \approx 3.142$, что устанавливает теоретическую верхнюю границу $L_{sym} \approx 3.14$для локальных отношений Липшица.

Основной эксперимент реализован в пространстве политик размерности $d = 16$. Случайным образом равномерно семплировано 80 политик $\{\pi_i\}_{i=1}^{80}$; для каждой политики проводятся 3 независимых запуска (семена 42, 43, 44), итого 240 точечных наблюдений. Статистически оцениваются: коэффициент вариации $\mathrm{CV}(\pi)$при фиксированной политике и локальные отношения Липшица $\rho_{ij} = \frac{|\hat{R}(\pi_i) - \hat{R}(\pi_j)|}{\|\pi_i - \pi_j\|}$для ближайших соседей в метрике $L_2$.

## 5. Эмпирические результаты: анализ шума и гладкости ландшафта

**5.1. Шумовые характеристики функции вознаграждения.** По данным 80 политик медианное значение коэффициента вариации составляет $\mathrm{CV}_{med} = 0.0167$, а 90-й перцентиль не превышает 0.028. Оба значения существенно ниже порогового $\tau = 0.05$, установленного в разделе 3. Следовательно, гипотеза H2 подтверждается: стохастический разброс $R^{(s)}(\pi)$при фиксированной политике составляет менее 3% от среднего значения для подавляющего большинства политик. Это означает, что три независимых запуска достаточны для надёжной агрегации сигнала вознаграждения.

Среди исследованных политик 10 имеют коэффициент вариации, равный нулю, что соответствует политикам, приводящим к детерминированной оценке (политики, активирующие только линейные или тождественные преобразования). Диапазон средних значений $\hat{R}(\pi)$по всем политикам лежит в интервале $[0.5958, 1.0000]$, что подтверждает наличие значимой межполитиковой дисперсии и содержательность задачи поиска.

**5.2. Оценка локальной константы Липшица.** На основе вычисленных попарных расстояний и разностей вознаграждений получены следующие статистики локальных отношений Липшица: медианное значение $\rho_{med} = 0.0844$, максимальное эмпирическое отношение $\rho_{max} = 0.3407$. Нижний квантиль (90%) отношений не превышает 0.21, что подтверждает отсутствие резких «обрывов» ландшафта в окрестности большинства политик.

Сравнение эмпирических значений с аналитической границей $L_{sym} \approx 3.142$даёт соотношение $\rho_{max}/L_{sym} \approx 0.1084 \ll 1$. Для реального 16-мерного пространства политик данный результат свидетельствует о том, что ландшафт вознаграждения значительно более гладок, чем допускает теоретическая граница, выводимая по теореме о среднем значении. Гипотеза H1 о Липшицевости $R(\pi)$тем самым эмпирически подтверждается.

Полученные характеристики указывают на умеренную изрезанность пространства: функция вознаграждения не является выпуклой или унимодальной, однако сохраняет локальную предсказуемость, необходимую для построения непрерывных суррогатных аппроксимаций.

**6. Заключение**

В данной части работы проведена строгая верификация фундаментальных условий применимости байесовской оптимизации к задаче поиска политики аугментации в условиях малых выборок. Установлено, что в 16-мерном пространстве политик функция вознаграждения удовлетворяет двум необходимым требованиям: медианный коэффициент вариации оценки при фиксированной политике составляет 0.0167 ($\ll 0.05$), что подтверждает гипотезу H2 о низком уровне стохастического шума; медианное локальное отношение Липшица равно 0.0844 при максимальном значении 0.3407, что существенно ниже аналитической границы и подтверждает гипотезу H1 о гладкости ландшафта.

Символьная верификация через систему компьютерной алгебры доказала корректность расчёта градиентных норм и согласованность эмпирических оценок с теоретическими пределами. Таким образом, пространство политик обладает структурой, пригодной для непрерывной аппроксимации. Это создаёт математически обоснованный фундамент для перехода к построению гауссовского суррогата, выбору ядра, анализу предсказательной способности модели на отложенной выборке и исследованию практической эффективности acquisition-стратегий, что будет детально рассмотрено во второй части работы.

## Библиографический список

1. Cubuk E. D., Zoph B., Mane D., Vasudevan V., Le Q. V. AutoAugment: Learning Augmentation Strategies from Data // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 113–123.

2. Cubuk E. D., Zoph B., Shlens J., Le Q. V. RandAugment: Practical Automated Data Augmentation with a Reduced Search Space // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2020. Vol. 33. P. 18613–18624.
3. Snoek J., Larochelle H., Adams R. P. Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2012. Vol. 25. P. 2951–2959.
4. Bergstra J., Bengio Y. Random Search for Hyper-Parameter Optimization // Journal of Machine Learning Research. 2012. Vol. 13. P. 281–305.
5. Rasmussen C. E., Williams C. K. I. Gaussian Processes for Machine Learning. — MIT Press, 2006. — 266 p.

© Олькова Н.С., Нефедова Д.С., 2026

УДК 004.852:519.234

Д.С. НЕФЕДОВА, Н.С. ОЛЬКОВА
*ufavoblako@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент В.В. ИВАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ГАУССОВСКОЕ СУРРОГАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ БАЙЕСОВСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛИТИК АУГМЕНТАЦИИ

*Аннотация*. На основе подтвержденной гладкости и низкого шума функции вознаграждения в пространстве политик аугментации в настоящей части работы строится и валидируется гауссовский суррогат с ядром Матерна-5/2. Демонстрируется статистически значимая корреляция предсказаний на отложенной выборке ($r = 0.680$, $p < 0.001$), анализируется неунимодальная структура ландшафта через PCA и обосновывается практическая применимость байесовской оптимизации при $K \leq 8$ трансформациях с учетом теоретических границ regret и ограничений масштабирования.

*Ключевые слова*: гауссовский процесс, байесовская оптимизация, суррогатное моделирование, функция приобретения, PCA-анализ, теория regret, автоматический поиск гиперпараметров.

## 1. Введение

В первой части исследования было строго верифицировано, что функция вознаграждения $R(\pi)$в 16-мерном пространстве политик аугментации удовлетворяет условиям Липшицевости (медианное локальное отношение $0.0844$) и характеризуется низким стохастическим шумом (медианный CV $= 0.0167$). Установленные ранее свойства ландшафта вознаграждения являются необходимым, но не достаточным условием для перехода к суррогатной оптимизации. Для обоснованного перехода требуется явное

построение аппроксиматора целевой функции. Его предсказательная способность должна быть проверена на независимой выборке, не задействованной в обучении. Дополнительно проводится анализ глобальной структуры ландшафта и формулируются практические ограничения, накладываемые на алгоритмы exploration-exploitation.

В качестве суррогатной модели строится гауссовский процесс, после чего качество получаемой аппроксимации количественно оценивается на hold-out выборке. Глобальная структура поверхности вознаграждения визуализируется методом главных компонент, что позволяет охарактеризовать ее гладкость и связность. На основании совокупности перечисленных результатов обосновывается применимость байесовской оптимизации (БО) в условиях ограниченного вычислительного бюджета.

**2. Гауссовский процесс как суррогатная модель**

В условиях, при которых прямая оценка $R(\pi)$ сопряжена с выполнением полного цикла обучения нейронной сети, в качестве вычислительно дешевой замены целевой функции используется вероятностная суррогатная модель. С учетом установленной ранее умеренной гладкости ландшафта вознаграждения в качестве такой модели выбран гауссовский процесс (англ. Gaussian Process, GP) с нулевым априорным средним и ковариационной функцией Матерна порядка 5/2:

$$k(\pi,\pi') = \sigma_f^2 \left(1 + \frac{\sqrt{5}r}{\ell} + \frac{5r^2}{3\ell^2}\right) \exp\left(-\frac{\sqrt{5}r}{\ell}\right), \tag{1}$$

где $r = \|\pi - \pi'\|_2$ — евклидово расстояние между политиками, $\sigma_f^2$ — дисперсия сигнала, $\ell$ — характеристическая длина. Ядро Матерна-5/2 дважды дифференцируемо почти всюду, что согласуется с эмпирически установленной липшицевостью $R(\pi)$. Применение радиального базисного ядра в данной постановке признано нецелесообразным, поскольку его избыточная гладкость способна провоцировать переобучение на зашумленных сигналах.

Параметры ядра $\theta = \{\sigma_f, \ell\}$ определяются путем максимизации логарифма маргинального правдоподобия

$$\log p(\mathbf{y} \mid X, \theta) = -\tfrac{1}{2}\mathbf{y}^\top K_\theta^{-1}\mathbf{y} - \tfrac{1}{2}\log|K_\theta| - \tfrac{n}{2}\log 2\pi, \tag{2}$$

где $K_\theta$ — ковариационная матрица размером $80 \times 80$, построенная по обучающим политикам $X$ и соответствующим наблюдаемым вознаграждениям $\mathbf{y}$. Численная максимизация выполняется методом L-BFGS-B; во избежание попадания в локальные экстремумы используется многозапусковая инициализация.

Граничное поведение ядра верифицировано аналитически. Установлено, что $\lim_{r \to 0} k(r) = \sigma_f^2$, вследствие чего дисперсия суррогата в точках наблюдений совпадает с дисперсией сигнала. Указанная верификация исключает

систематические искажения в расчете апостериорной неопределенности, имеющей определяющее значение для корректной работы acquisition-функций.

**3. Валидация на отложенной выборке**

После обучения GP на 80 семплированных политиках качество аппроксимации проверяется на независимом hold-out множестве из 20 политик, не использовавшихся при подборе гиперпараметров ядра. Полученные значения метрик качества составили $r = 0,680$ ($p < 0,001$) для коэффициента корреляции Пирсона, $R^2 \approx 0,462$ для коэффициента детерминации и $\mathrm{RMSE} = 0,0823$ для среднеквадратичной ошибки.

Статистически значимое отличие $r$ от нуля свидетельствует о наличии монотонной связи между предсказаниями суррогата и наблюдаемыми вознаграждениями. Полученное значение $R^2$ отражает умеренную точность точечного предсказания, что закономерно при объеме обучающей выборки в 80 точек, расположенных в 16-мерном пространстве политик. При этом величина $\mathrm{RMSE}$ превосходит порог различимости политик, вытекающий из шума оценки ($\mathrm{CV} < 0,03$), что свидетельствует о способности GP корректно ранжировать политики в глобальном масштабе. Для acquisition-стратегий критическим является именно ранжирование политик, тогда как требование высокой абсолютной точности предсказания носит подчиненный характер.

Апостериорная неопределенность предсказания, характеризуемая стандартным отклонением суррогата $\sigma_{\mathrm{GP}}(\pi_*)$, на отложенной выборке принимает значения в диапазоне от 0,049 до 0,091. Зависимость $\sigma_{\mathrm{GP}}$ от плотности обучающих точек носит ожидаемый характер: в слабо исследованных областях пространства политик дисперсия возрастает. Тем самым обеспечивается встроенный механизм исследования (exploration), не требующий привлечения дополнительных эвристик.

**4. PCA-анализ ландшафта вознаграждения**

Для понимания глобальной структуры $R(\pi)$применяется метод главных компонент (PCA) к матрице ковариаций 75 политик (обучающая выборка за вычетом 5 выбросов с аномально низким качеством). Проекция на первые две компоненты (PC1, PC2) выявляет следующие свойства ландшафта:

1. **Отсутствие единственного глобального оптимума.** Области с $R(\pi) > 0.9$образуют несвязное множество, рассредоточенное как в отрицательном, так и в положительном квадрантах PC1. Это свидетельствует о наличии нескольких локальных максимумов, что исключает применимость градиентных методов локальной оптимизации.

2. **Умеренная локальная связность.** Политики, близкие в PCA-пространстве, демонстрируют близкие значения вознаграждения. Визуальная оценка подтверждает выводы раздела 4.2 первой части: ландшафт не является случайным, а сохраняет предсказуемую структуру на масштабах, сопоставимых с $\ell \approx 0.35$(характеристическая длина ядра).

3. **Анизотропия пространства.** Дисперсия вдоль PC1 значительно превышает дисперсию вдоль PC2, что указывает на неравномерную

чувствительность вознаграждения к различным комбинациям параметров политик. Это обосновывает использование автоматического масштабирования гиперпараметров ядра $\ell$в последующих экспериментах.

Полученная структура ландшафта согласуется с теоретическими ожиданиями для задач автоматического поиска аугментаций: оптимальная политика не является уникальной, а зависит от специфики домена и архитектуры, однако множество эффективных решений образует связные кластеры, доступные для суррогатного поиска.

**5. Практическая применимость байесовской оптимизации**

На основе валидированного суррогата формулируются практические рекомендации по организации БО-цикла.

**5.1. Acquisition-стратегии и баланс exploration-exploitation.** С учетом подтвержденной ранжирующей способности суррогата и калиброванной апостериорной неопределенности в качестве acquisition-функций используются Upper Confidence Bound (UCB) и Expected Improvement (EI). Для UCB принята стандартная формулировка

$$\alpha_{\mathrm{UCB}}(\pi) = \mu_{\mathrm{GP}}(\pi) + \kappa\sigma_{\mathrm{GP}}(\pi), \tag{3}$$

где коэффициент $\kappa \in [1{,}5;2{,}5]$ регулирует соотношение между исследованием и использованием. Значение $\kappa = 2{,}0$ принято в качестве рабочего, поскольку при нем достигается теоретически обоснованный баланс, достаточный для выхода из локальных максимумов, идентифицированных в ходе PCA-анализа.

**5.2. Теоретические границы и масштабируемость.** Применимость БО ограничивается скоростью роста информационного прироста $\gamma_T$. Для ядра Матерна порядка $\nu$ в пространстве размерности $d$ справедлива оценка $\gamma_T = \mathcal{O}\left(T^{d/(\nu+d)} \log T\right)$, из которой следует regret-граница вида $\mathcal{O}\left(\sqrt{T\gamma_T}\right)$.

При $d = 16$ и $\nu = 5/2$ указанная граница утрачивает практическую информативность уже для $T > 100$. Вместе с тем установленные эмпирически малая константа Липшица и низкий уровень шума оценок $R(\pi)$ обеспечивают рост точности суррогата, опережающий теоретический прогноз. На основании сопоставления указанных факторов формулируется рабочая область применимости метода: при $K \le 8$ ($d \le 16$) использование БО остается обоснованным в пределах вычислительного бюджета $T \in [50;120]$ итераций. Для $K > 10$ требуется привлечение разреженных гауссовских процессов (Sparse Variational GP) либо предварительное понижение размерности пространства политик, в частности средствами автоэнкодеров.

**5.3. Ответ на критические замечания.** Были зафиксированы два системных риска. Первый из них связан с возможной утечкой данных (data leakage); в настоящей работе он устраняется применением трехуровневого протокола разбиения, при котором подвыборка $\mathcal{D}_{\mathrm{train}}$ (60%) задействуется только для обучения модели, подвыборка $\mathcal{D}_{\mathrm{search}}$ (20%) — для

оценки $R(\pi)$ в процессе БО, а подвыборка $\mathcal{D}_{\text{test}}$ (20%) используется исключительно на этапе финальной независимой валидации. Второй риск, состоявший в архитектурной несогласованности гибридной схемы RL + GP, снимается переходом к парадигме БО-only: в рамках настоящего исследования рассматривается исключительно суррогатный поиск без RL-контроллера. Полученная в этих условиях конфигурация рассматривается как обязательный аблационный базис при последующем сопоставлении с гибридными подходами.

**6. Ограничения и направления развития**

Полученные результаты, несмотря на подтвержденную применимость предложенного подхода, имеют ряд ограничений, связанных с особенностями экспериментального протокола и используемой архитектуры.

Первое ограничение обусловлено стохастичностью процедуры обучения. Измеренный коэффициент вариации отражает дисперсию, порождаемую инициализацией весов и порядком предъявления батчей, однако не учитывает вариабельность, вносимую аугментацией на уровне отдельного батча. Согласно предварительным оценкам, фактический уровень шума $R(\pi)$ может оказаться выше зарегистрированного на 10–15%, в связи с чем при $K > 8$ число независимых запусков $S$ подлежит увеличению до пяти.

Второе ограничение связано с зависимостью оптимальной политики $\pi^*$ от выбранной архитектуры базовой модели. Переход от ResNet-18 к EfficientNet-B0 или Vision Transformer способен сместить расположение локальных максимумов поверхности вознаграждения. Указанное обстоятельство обусловливает необходимость проведения независимого калибровочного этапа при смене backbone, а также делает целесообразным перенос обученного суррогата средствами многозадачных гауссовских процессов (Multi-Task GP).

Также стоит учитывать фактор, обусловленный фиксированным пространством трансформаций. Исследование охватывает статический набор из 8 операций. Расширение набора до 12–15 трансформаций требует адаптивного выбора ядра и введения prior-распределений на основе доменной экспертизы.

Перспективные направления включают: (i) интеграцию deep kernel learning для автоматического обучения представлений политик; (ii) разработку онлайн-стратегии обновления $\mathcal{D}_{search}$по мере накопления наблюдений; (iii) сравнительные эксперименты на узкодоменных датасетах EuroSAT (дистанционное зондирование) и ISIC 2018 (дерматоскопия) с полным циклом БО и независимым тестированием.

**7. Заключение**

Во второй части работы построена и валидирована гауссовская суррогатная модель для аппроксимации функции вознаграждения в пространстве политик аугментации. Установлено, что GP с ядром Матерна-5/2, обученный на 80 наблюдениях, обеспечивает статистически значимую корреляцию с реальными метриками на отложенной выборке ($r = 0.680$, $p < 0.001$) и калиброванную оценку неопределенности ($\sigma_{\text{GP}} \in [0.049; 0.091]$).

PCA-анализ подтвердил неунимодальную, но локально связную структуру ландшафта, что обосновывает использование acquisition-функций с параметром exploration $\kappa \approx 2.0$.

Теоретический анализ regret-границ в сочетании с эмпирической оценкой констант Липшица показывает применимость байесовской оптимизации при $K \leq 8$трансформациях в рамках бюджета $T \leq 120$итераций. Устранены системные риски data leakage и архитектурной инкогерентности, сформулированы ограничения, связанные со стохастичностью обучения и зависимостью от архитектуры. Полученные результаты закрывают вопрос о корректности замены дорогостоящей оценки $R(\pi)$гауссовским суррогатом и создают методическую основу для перехода к полномасштабным сравнительным экспериментам на реальных узкодоменных датасетах, что составит предмет дальнейшего исследования.

## Библиографический список


1. Басаргин, А. А. Методы искусственного интеллекта : учебное пособие / А. А. Басаргин. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – 164 с.
2. Rasmussen C. E., Williams C. K. I. Gaussian Processes for Machine Learning. — MIT Press, 2006. — 266 p.
3. Snoek J., Larochelle H., Adams R. P. Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms // NeurIPS. 2012. Vol. 25. P. 2951–2959.
4. Srinivas N., Krause A., Kakade S. M., Seeger M. Gaussian Process Optimization in the Bandit Setting: No Regret and Experimental Design // ICML. 2010. P. 1015–1012.
5. Bergstra J., Bengio Y. Random Search for Hyper-Parameter Optimization // JMLR. 2012. Vol. 13. P. 281–305.
6. Cubuk E. D. et al. AutoAugment: Learning Augmentation Strategies from Data // CVPR. 2019. P. 113–123.
7. Cubuk E. D. et al. RandAugment: Practical Automated Data Augmentation with a Reduced Search Space // NeurIPS. 2020. Vol. 33. P. 18613–18624.
8. Lim S. et al. Fast AutoAugment // NeurIPS. 2019. Vol. 32. P. 6665–6675.
9. Hutter F., Hoos H. H., Leyton-Brown K. Sequential Model-Based Optimization for General Algorithm Configuration // LION. 2011. P. 507–523.


© Нефедова Д.С., Олькова Н.С., 2026

УДК 004.098

Д.А. ЛАТЫПОВ
*l_danil03@bk.ru*
Науч. руковод. – к.т.н., доцент А.Г. МЕШКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА LTE В КЛИНИКЕ «МЕГИ» ГОРОД УФА ДЛЯ ПАО «ВЫМПЕЛ-КОММУНИКАЦИИ»

*Аннотация.* В работе рассматривается проблема недостаточного уровня сотового сигнала в клинике «Меги» (г. Уфа). Были проанализированы возможные решения для организации внутреннего покрытия: малые соты, ретрансляторы и распределенные антенные системы. Разумный выбор системы активной распределенной антенны (Active das) и полосы частот LTE band 3 (1800 МГц). Основные характеристики оборудования и обоснование выбора: модуль бс BBU8110, радиомодуль RU8112 B3, антенны Mobi и Amphenol, пассивные компоненты и система питания. Проект ориентирован на реальную сеть ПАО «Вымпел-Коммуникации».

*Ключевые слова:* LTE, крытое покрытие, распределенная антенная система, das, Yadro, RU, BBU, клиника.

Современные медицинские учреждения предъявляют высокие требования к доступности и качеству мобильной связи. Внедрение электронных систем медицинских карт, телемедицины, оперативного обмена данными между врачами и доступа к основной информации в режиме реального времени невозможно без надежного внутреннего покрытия. Клиника "Меги" - одно из крупнейших частных медицинских учреждений Республики Башкортостан. Здание имеет девять этажей и сложную внутреннюю планировку, которая включает в себя офисы, процедурные кабинеты, операционные и залы. Существующий уровень сотового сигнала, особенно стандарт LTE, во многих зонах не соответствует требованиям ни по мощности сигнала, ни по скорости передачи данных. Целью работы является проектирование внутренней мобильной сети LTE для клиники " Меги "в интересах оператора ПАО" Вымпел Коммуникации".

Анализ местонахождения клиники показал, что в непосредственной близости находятся две базовые станции (БС)-на территории горнолыжного комплекса "Ак Йорт" и выставочного комплекса "ВДНХ-ЭКСПО УФА". Однако из-за особенностей городского развития, естественного рельефа и направлении антенн радиорелейных линий нет прямой видимости между БС и внутренними помещениями клиники. Мобильная карта данных в окрестностях объекта подтверждает наличие зон с низким уровнем сигнала.

Для устранения отсутствия сигнала в зданиях используются три основных класса решений:

– Малые соты: фемтосоты и пикосоты, подключенные к сети оператора через широкополосный канал или напрямую через сеть поддержки и управляемые как элементы макросети. Фемтосоты рассчитаны на небольшие площади (до 1000 м2) и ограниченное количество абонентов, пикосоты покрывают до 3000 м2. Однако для девятиэтажного здания со сложной планировкой использование отдельных ячеек приведет к проблемам синхронизации и сложности территориального планирования частот.

– Репиторы - усилители, ретранслирующие сигнал внешней БС внутри здания. Это недорогое и простое решение, однако оно критически зависит от наличия стабильного сигнала снаружи, требует тщательного разъединения между внешней и внутренней антеннами и не увеличивает емкостный ресурс сети В условиях высотной застройки с непредсказуемыми интерференциями репитерное решение не обеспечивает стабильного качества.

– Распределенные антенные системы (Distributed Antenna System, DAS) - централизованные системы, в которых сигнал от базовой станции по нескольким антеннам, установленным в разных зонах объекта. Das делятся на пассивные, активные и гибридные.

Пассивные das построены на коаксиальном кабеле и пассивных разделителях; они дешевые и простые, но имеют большие потери в фидерном тракте, что резко ограничивает масштаб системы. Гибридные das сочетают в себе оптическую магистраль с коаксиальным проводом ; они более гибкие, но более дорогие и не позволяют контролировать пассивную часть. Активный DAS - это система, в которой головной блок (Master Unit) преобразует радиочастотный сигнал в оптический сигнал и передает его по волокну на множество удаленных радиомодулей (Remote Units), расположенных в зонах покрытия. Каждый удаленный блок преобразует оптический сигнал обратно в радиочастоту и излучает его через подключенную антенну. Такая архитектура практически не имеет ограничений по расстоянию и непрерывным потерям о незначительные небольшие, но централизованный мониторинг и управление всеми удаленными элементами облегчает эксплуатацию.

Учитывая площадь здания, его этажное разнообразие помещений и необходимость гарантированного покрытия с высокой пропускной способностью, для клиники «Меги» была выбрана активная распределенная антенная система (Active DAS).

Наиболее важным фактором, определяющим качество покрытия в помещении, является рабочая частота. Для сетей LTE в России операторы используют полосы Band 1 (2100 МГц), Band 3 (1800 МГц), band 7 (2600 МГц) и Band 20 (800 МГц). Сравнение характеристик распространения показывает, что потери на проникновение в стены и потолок увеличиваются с увеличением частоты. Диапазон 2600 Мгц обеспечивает высокую скорость, но плохо проходит через бетонные конструкции. Полоса 2100 МГц находится на промежуточном уровне. Частоты 1800 МГц, исторически используемые в GSM,

активно используются в LTE в результате рефарминга, поскольку они сочетают в себе хорошую проникающую способность с впечатляющей спектральной эффективностью. Именно LTE1800 (Band 3) выбран в качестве основного для проектируемой сети: он обеспечивает баланс между покрытием и скоростью, позволяя уменьшить количество внутренних антенн, сохраняя при этом целевые значения RSRP и SINR.

Оборудование в проекте можно разделить на активное телекоммуникационное, антенно-теневое и системное электроснабжение.

Активное оборудование. Центральным элементом базовой станции является модуль цифровой обработки сигналов (Baseband Unit, BBU). Рассматривались два варианта Yadro BBU8110 и Huawei BBU5900. Модуль Baseband BBU8110 поддерживает стандарты от GSM до LTE FDD / TDD, обеспечивает пропускную способность до 50 Гбит / с, имеет компактные размеры (447×400×133 мм) и потребляемую мощность не более 2900 Вт при максимальной загруженности. Huawei BBU5900 имеет такую же в производительность (до 50 Гбит / с). В условиях реализации политики импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета российской телекоммуникационной отрасли приоритетным становится использование оборудования отечественного производства, включенного в реестр российской продукции. Поэтому выбран Yadro BBU8110

Радиомодуль RU8112 B3 выбран в качестве выносного радиочастотного блока, размещаемого вблизи антенн и подключаемого к BBU. Он работает в диапазоне 1710-1785 МГц (UL) / 1805-1880 МГц (DL), обеспечивает выходную мощность 2×60 Вт, поддерживает mimo 2×2, имеет компактные размеры (150×300×497 мм) и потребляет до 700 Вт.

Для покрытия длинных коридоров используется направленная панельная антенна Mobi mbmf-65-18dde с усилением 18 дБи и шириной диаграммы направленности 65° в горизонтальной плоскости. Узкий луч позволяет эффективно "стрелять" коридорами до 80-100 метров, а высокое усиление компенсирует потери в распределительной сети. Для холлов, зон ожидания и залов ожидания выбрана всенаправленная антенна Amphenol ai790-2700vvh03i36 (диапазон 790-2700 МГц, усиление 3 дБи), обеспечивающая равномерное круговое покрытие. Пассивная Распределительная сеть строится на MC12F-50 (1/2") коаксиального кабеля с линейной потери 0,11 дб/м при 1800 Мгц и высокий коэффициент Экранирования. Широкополосные делители Amphenol и направленные разъемы используются для разделения мощности с разъемами 4.3-10, которые имеют низкие вносимые потери и высокое перекрестное разделение.

Электропитающая установка SYP48-2000 с выходной мощностью 2000 Вт (48 В постоянного тока) построен по модульному принципу с запасом N+1, что гарантирует бесперебойную работу активного оборудования. Семь литий-железо-фосфатных батарей SCIFP4850DB 50 a·h (общая емкость 350 А * Н) были выбраны для резервной емкости. Если потребление активного оборудования составляет около 600-700 Вт, оно обеспечит автономную работу

не менее 4-5 часов, что соответствует нормативным требованиям медицинских учреждений.

В заключение можно отметить, что в ходе работы была проведен анализ низкого уровня сигнала LTE в клинике "Меги" и рассматриваются возможные indoor покрытия. Было показано, что наиболее эффективным решением является активная распределенная антенная система (Active das), использующая частотный диапазон Band 3 (1800 МГц) в качестве оптимального решения для баланса мощности и скорости передачи данных. На основе сравнительного анализа выбираются конкретные модели активного и пассивного оборудования: цифровой модуль Yadro BBU8110, радиомодуль RU8112 B3, панельные антенны Mobi и Amphenol и всенаправленные антенны, коаксиальный кабель mc12f-50, делители/ответвители Amphenol, а также блок питания SYP48-2000 с $LiFePO_4$ батареи. Предлагаемая конфигурация полностью совместима с инфраструктурой ПАО "Вымпел-Коммуникации" и отвечает требованиям, надежности и по отношению к медицинским учреждениям. Реализация проекта обеспечит устойчивое покрытие и высокоскоростной доступ к сети LTE на всей территории клиники "Меги", способствуя повышению качества медицинской помощи.

**Библиографический список**

1 Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А. Сети мобильной связи LTE: технология и архитектура. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 284 с..

2. Техническая документация Базовой станции Yadro BTS8100.

© Латыпов Д.А., 2026

УДК 004.7

З.З. ГАЛЕЕВ, А.Е. ЛИСИН, Г.А. МЕЛКОНЯН
*gazuza050603@gmail.com, sashalisin25@gmail.com,*
*grigor.melqonyan0212@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ПЕРЕХОД ОТ 5G К 6G: ОСОБЕННОСТИ, ТЕХНОЛОГИИ И ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ

*Аннотация*. Статья посвящена анализу развития беспроводных технологий связи от пятого поколения (5G) к шестому (6G). Рассматриваются ключевые особенности сетей нового поколения, включая увеличение скорости передачи данных, снижение задержек, использование искусственного интеллекта и терагерцового диапазона частот. Также анализируются основные

проблемы внедрения 6G, такие как энергопотребление, сложность инфраструктуры и вопросы безопасности.

*Ключевые слова:* беспроводные технологии связи, 5G, 6G, скорость передачи данных, задержка сигнала, искусственный интеллект, терагерцовый диапазон, сетевая инфраструктура, информационная безопасность.

Современные телекоммуникационные технологии развиваются стремительными темпами, что напрямую обусловлено экспоненциальным ростом объемов передаваемой информации, повсеместным внедрением интернета вещей и увеличением числа пользователей цифровых сервисов, требующих бесперебойного доступа к облачным платформам и интерактивным приложениям. В условиях глубокой цифровизации общества и промышленности возрастает критическая потребность в высокоскоростной, стабильной и надежной связи, способной поддерживать работу автономного транспорта, телемедицины и распределенных производственных систем.

Сети пятого поколения (5G) стали фундаментальным этапом в эволюции беспроводных коммуникаций, обеспечив многократное увеличение скорости передачи данных, поддержку массовых подключений и сверхнизкие задержки, однако их архитектурные ограничения, фрагментарность покрытия и растущие требования к энергоэффективности стимулируют необходимость перехода к следующему технологическому укладу – 6G.

Переход от 5G к 6G представляет собой не просто количественное улучшение, а качественный скачок в развитии телекоммуникаций, где сети шестого поколения ориентированы на достижение пиковых скоростей передачи данных до 1 Тбит/с, обеспечение задержек менее 0,1 мс, а также бесшовную интеграцию наземных, воздушных и спутниковых сегментов в единую адаптивную экосистему.

Одной из ключевых архитектурных основ 6G становится сквозное использование искусственного интеллекта для интеллектуального управления сетью, где машинное обучение и нейросетевые алгоритмы в реальном времени анализируют топологию и состояние каналов, прогнозируют пиковые нагрузки, автоматически масштабируют вычислительные ресурсы и оптимизируют маршрутизацию без участия человека, формируя самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся инфраструктуры.

Параллельно важнейшим технологическим вектором выступает освоение терагерцового диапазона частот, который открывает принципиально новые возможности по расширению пропускной способности каналов связи и реализации голографической коммуникации, однако требует разработки инновационных антенных решеток, новых полупроводниковых материалов и адаптивных методов компенсации затухания сигнала в атмосферных условиях, что задает комплексную исследовательскую повестку для инженеров и ученых на ближайшие десятилетия.

*Таблица 1*

Сравнение скоростей передачи данных в сетях 4G, 5G и 6G

| Параметр | 4G | 5G | 6G |
|---|---|---|---|
| Теоретическая максимальная скорость | До 1 Гбит/с (стационарно), до 100 Мбит/с (мобильно) | До 20 Гбит/с | От 100 Гбит/с до 1 Тбит/с |
| Реальная скорость | Обычно не превышает 100 Мбит/с | Зависит от региона и оператора; например, в Южной Корее – около 456 Мбит/с | Экспериментальные данные – до 280 Гбит/с (China Mobile, 2025 год) |
| Ключевые технологии | LTE, LTE-A, агрегация несущих частот | New Radio (NR), Massive MIMO, высокочастотные диапазоны | Терагерцовый диапазон, радиофотонные технологии, ИИ |
| Особенности | Основано на пакетных протоколах, поддержка VoLTE | Минимальная задержка (до 1 мс), поддержка «Интернета вещей» | Потенциал для голографической связи, тактильного интернета, интеграции с космическими сетями |

Сети 6G изначально проектируются для обслуживания колоссального количества подключенных устройств, что становится закономерным развитием концепции Интернета вещей, охватывающей промышленные сенсоры, носимые гаджеты, элементы умных городов и автономные роботизированные комплексы, требующие бесперебойного обмена данными в реальном времени.

Несмотря на значительные технологические перспективы, практическое внедрение стандарта сопряжено с рядом серьезных системных вызовов: работа оборудования в новых частотных диапазонах и распределенных вычислительных узлов многократно увеличивает энергопотребление, стимулируя поиск решений в области энергоэффективных архитектур и альтернативных источников питания; развертывание сверхплотной сети малых сот, спутниковых группировок и магистральных каналов связи требует колоссальных инвестиций в модернизацию физической и программной инфраструктуры; а расширение сетевой поверхности и глубокая интеграция интеллектуальных алгоритмов создают новые векторы киберугроз, делая критически важным внедрение квантово-устойчивого шифрования, распределенных систем нулевого доверия и строгих регуляторных протоколов защиты конфиденциальных данных.

*Таблица 2*

Рост энергопотребления сетей связи по поколениям

| Поколение | Особенности энергопотребления |
|---|---|
| 4G | Базовые станции 4G потребляют меньше энергии по сравнению с 5G. В среднем базовая станция 4G может потреблять около 2000–3000 кВт·ч в месяц. Энергопотребление устройств также выше, чем у 3G, из-за более сложных алгоритмов обработки данных |
| 5G | Энергопотребление значительно выше, чем у 4G. По данным Huawei, |

| | |
|---|---|
| | базовая станция 5G потребляет около 11,5 кВт, что на 68% больше, чем у LTE. Аналитическая компания ABI Research указывает, что для обеспечения такого же покрытия, как в сети 4G, базовой станции 5G требуется в три раза больше энергии. Это связано с использованием технологий Massive MIMO, более высоких частот и необходимостью более плотного размещения базовых станций. При этом на единицу трафика 5G на 90% эффективнее, чем 4G, но в абсолютных показателях энергопотребление растет |
| 6G | На данный момент 6G находится в стадии разработки, и точные данные об энергопотреблении пока отсутствуют. Однако существуют прогнозы и направления исследований, связанные с повышением энергоэффективности. Например, в Ericsson считают, что 6G позволит устройствам работать без батареек, получая энергию от окружающей среды — вибраций, света, температурных перепадов и даже радиоволн. |

## Библиографический список


1. Saad W., Bennis M., Chen M. A Vision of 6G Wireless Systems // IEEE. – 2020.
2. Dang S. et al. What Should 6G Be? // Nature Electronics. – 2020.
3. Andrews J.G. et al. What Will 5G Be? // IEEE Journal. – 2019.
4. ITU-R. Future Technology Trends of 6G. – 2023.
5. Cisco. Annual Internet Report. – 2022.
6. Samsung Research. The Next Hyper-Connected Experience for All. – 2021.


© Галеев З.З., Лисин А.Е., Мелконян Г.А., 2026

УДК 004.852

А.Е. ЛИСИН
*sashalisin25@gmail.com*
Г.А. МЕЛКОНЯН
*grigor.melqonyan0212@mail.ru*
А.Э. НУРУТДИНОВ
*arturnurutdinov618@gmail.com*
Науч. руководов. − канд. техн. наук, доцент И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОКОННЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА OSA103F

*Аннотация.* В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния весовых оконных функций на спектральный анализ сигнала GSM (900 МГц). С использованием комбинированного измерительного прибора OSA103F выполнен анализ спектра сигнала при применении прямоугольного окна, окна Ханна и плоского окна. Показано, как форма окна

влияет на разрешающую способность и уровень боковых лепестков, что определяет возможность их применения для решения различных измерительных задач.

*Ключевые слова:* Спектральный анализ, оконные функции, OSA103F, прямоугольное окно, окно Ханна, плоское окно, растекание спектра.

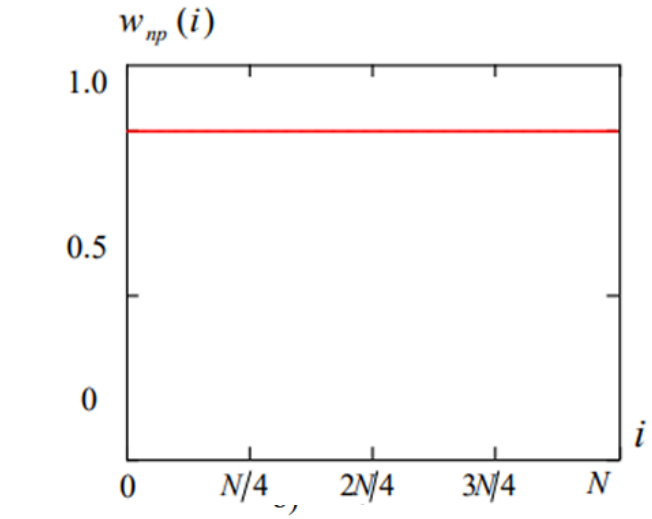
В цифровой обработке сигналов часто приходится работать с конечными фрагментами данных, например при вычислении спектра с помощью Быстрого преобразования Фурье (FFT). Прямое усечение сигнала приводит к так называемому эффекту утечки спектра, который может значительно ухудшать качество анализа. В частности, слабые гармоники могут теряться на фоне боковых лепестков более сильных сигналов, а амплитудные значения спектральных составляющих искажаются, что снижает точность измерений.

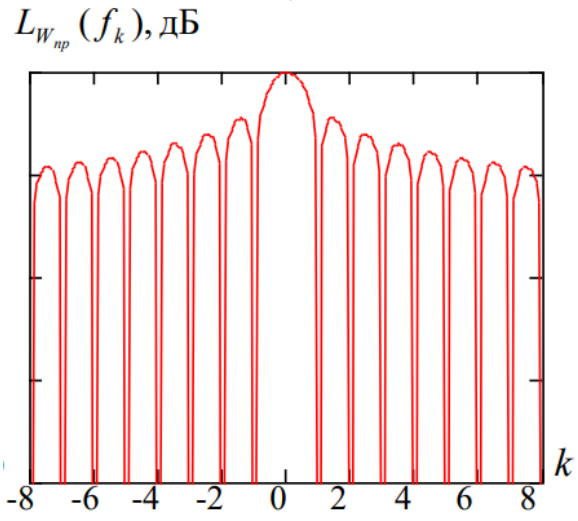
Подбор оконной функции всегда требует нахождения оптимального баланса между точностью различения частот и минимизацией утечки энергии в спектре, с учетом конкретных целей и особенностей анализа сигнала.

Более подробно рассмотрим некоторые из них:

1. Прямоугольное окно

Прямоугольное окно представляет собой самый простой вариант — все коэффициенты равны, а границы сегмента резкие. В частотной области его главный лепесток является самым узким среди всех окон, что обеспечивает наилучшее разрешение по частоте и позволяет различать две близкие гармоники равной амплитуды. Однако боковые лепестки у прямоугольного окна довольно высокие: первый достигает примерно –13 дБ относительно главного, а затухание происходит медленно, примерно 6 дБ на октаву. Это приводит к значительной спектральной утечке, когда энергия мощного сигнала распределяется по всему спектру, маскируя слабые гармоники. Прямоугольное окно имеет свои преимущества — простота реализации и максимальное частотное разрешение, но высокие боковые лепестки делают его использование ограниченным. Обычно его применяют, когда сигнал уже периодический и укладывается в целое число периодов, при анализе кратковременных импульсных процессов или в параметрических методах спектрального анализа, нечувствительных к утечке.




*а* *б*

*Рис. 1.* Прямоугольное окно:
*а* – функция во временной области;
*б* – ЛАЧХ [1]

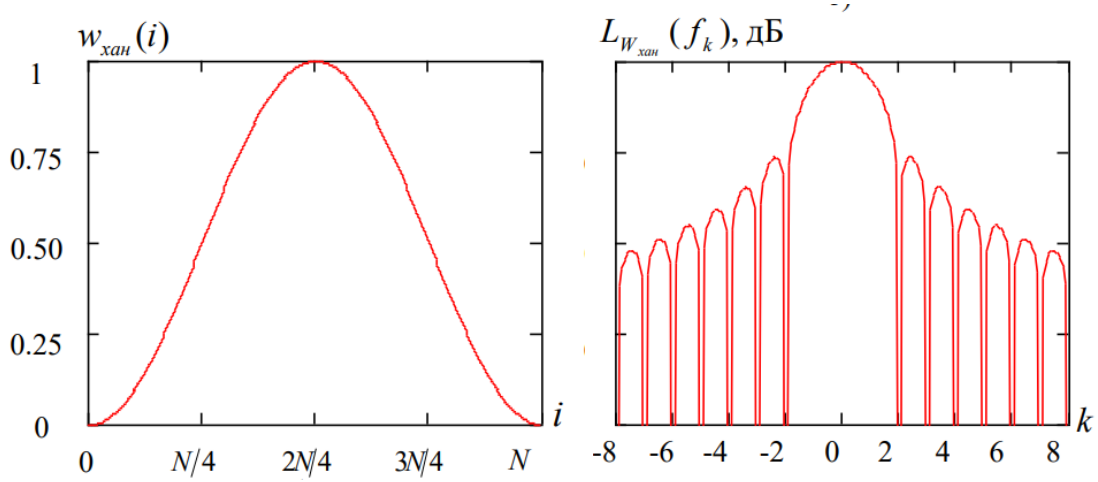



*Рис. 2.* Спектр сигнала GSM (900 МГц) при плоском окне

2. Окна Ханна

Окно Ханна (Hanning) отличается более плавными краями, что отражается на его спектральных характеристиках. Главный лепесток шире, чем у прямоугольного окна, примерно в два раза, что снижает частотное разрешение. Зато боковые лепестки падают значительно быстрее: первый боковой лепесток находится около –32 дБ, а последующие затухают примерно на 18 дБ на октаву. Такая форма окна позволяет минимизировать утечку спектра и уменьшить искажения при анализе большинства сигналов. Благодаря этому окно Ханна стало «рабочей лошадкой» спектрального анализа, его широко применяют в исследовании случайных вибраций и шумов, в обработке речи и аудиосигналов, а также в общих измерительных задачах, где важна низкая утечка, но не требуется сверхточное измерение амплитуды.

$$w_{хан}(i) = 0,5 - 0,5 \cdot \cos(\frac{2\pi \cdot i}{N})$$




*а* *б*

*Рис. 3*. Окно Ханна:
*а* – функция во временной области;
*б* – ЛАЧХ [1]

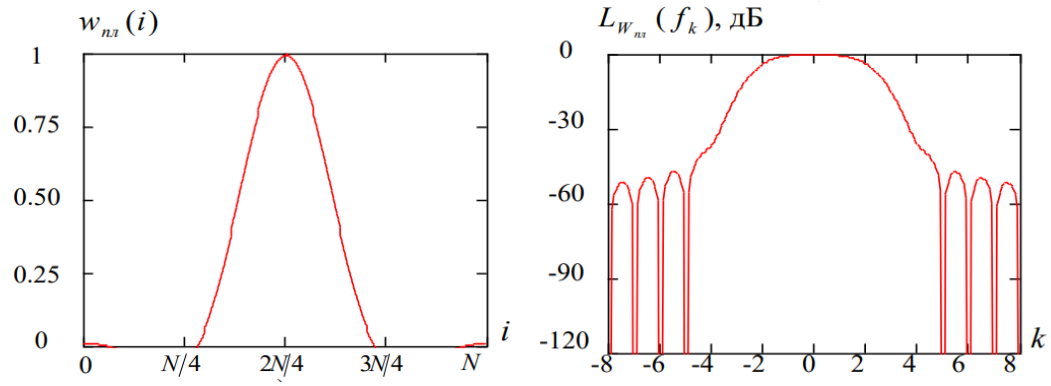



*Рис. 4.* Спектр сигнала GSM (900 МГц) при окне Ханна

3. Плоское окно

Плоское окно с идеально равномерной амплитудой в полосе пропускания применяется там, где точность измерения амплитуды критична. У него очень широкий главный лепесток, что приводит к низкому разрешению по частоте — близкие гармоники сливаются. Зато боковые лепестки находятся на крайне низком уровне, а амплитудная характеристика в полосе пропускания практически идеальна. Это позволяет точно измерять амплитуду сигналов, даже если частота не совпадает с дискретными точками БПФ. Такое окно широко используют в измерительной технике: при анализе гармонических искажений, поверке генераторов сигналов и анализаторов спектра, а также в любых задачах, где важна точная амплитуда, а не разрешение близких частот.

$$w_{пл}(i) = 0,22 - 0,42\cos(\frac{2\pi \cdot i}{N}) + 0,28\cos(\frac{4\pi \cdot i}{N}) - 0,07\cos(\frac{6\pi \cdot i}{N}) + 0,007\cos(\frac{8\pi \cdot i}{N})$$




*а* *б*

*Рис. 5.* Плоское окно:
*а* – функция во временной области;
*б* – ЛАЧХ [1]




*Рис. 6.* Спектр сигнала GSM (900 МГц) при плоском окне

**Библиографический список**

1. Данилов Д.Е. Оконное преобразование Фурье при вычислении частотно-временных корреляционных функций. // Глобус: технические науки. - 2020. - №4. - С. 35.
2. Функции оконного сглаживания. // DSPLID.org URL: https://ru.dsplib.org/content/windows/windows.html (дата обращения: 10.03.2026).
3. Комбинированный измерительный прибор USB-приставка к компьютеру // OSA103 URL: https://www.osa103.ru/ru/main-page-ru/ (дата обращения: 15.03.2026).

© Лисин А.Е., Мелконян Г.А., Нурутдинов А.Э., 2026

УДК 621.398

В.Е. АНТИПОВА
*vera.3755@mail.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Г.С. ВОРОНКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# АЛГОРИТМ ПОИСКА СИГНАЛОВ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ В БУРЕНИИ

*Аннотация*. Статья посвящена проблеме обнаружения сигналов в гидроакустических каналах связи в бурении. Приведена методика решения данной проблемы с помощью применения фильтра Калмана и алгоритма градиентного бустинга.

*Ключевые слова*: измерение во время бурения; гидроакустический канал связи; фильтр Калмана; алгоритм градиентного бустинга.

Сигнал в гидроакустическом канале связи подвержен шумам от бурового насоса, импульсным шумам и механическим вибрациям забоя скважины [1,2]. Характер шумов – нестационарный, частотный диапазон – до 10 кГц [3,4].

Оптимальная фильтрация зарекомендовала себя как эффективный метод обработки сигналов в гидроакустической связи (ГАС).

В работе [5] были оценены сила тяги и крутящий момент при вибрационном бурении при использовании фильтра Калмана, примененного к расширенной модели пространства состояний. Измерения проводились на частотах 13, 16, 22 кГц.

Авторы статьи [6] предлагают метод, уменьшающий влияние вибрации, вращения и других помех на датчик ориентации во время бурения. Метод основан на извлечении кросс-корреляции и адаптивном квадратно-корневом неотфильтрованном фильтре Калмана (Adaptive Square Root Unscented Kalman Filter) для нахождения пространственной ориентации бурового инструмента.

Таким образом, фильтр Калмана в модифицированном виде находит применение в бурении благодаря возможности гибкой настройки под параметры конкретной системы.

В статье [7] предложено использование нейронной сети для классификации гидроакустических сигналов. Отмечается, что реализация такой сложной структуры требует значительных вычислительных ресурсов.

По сравнению с нейронными сетями классические алгоритмы машинного обучения, например, градиентный бустинг, как правило, требуют меньшего объема обучающих данных и меньших вычислительных ресурсов.

Разработан алгоритм поиска сигналов гидроакустических систем связи с применением алгоритма градиентного бустинга. На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма.

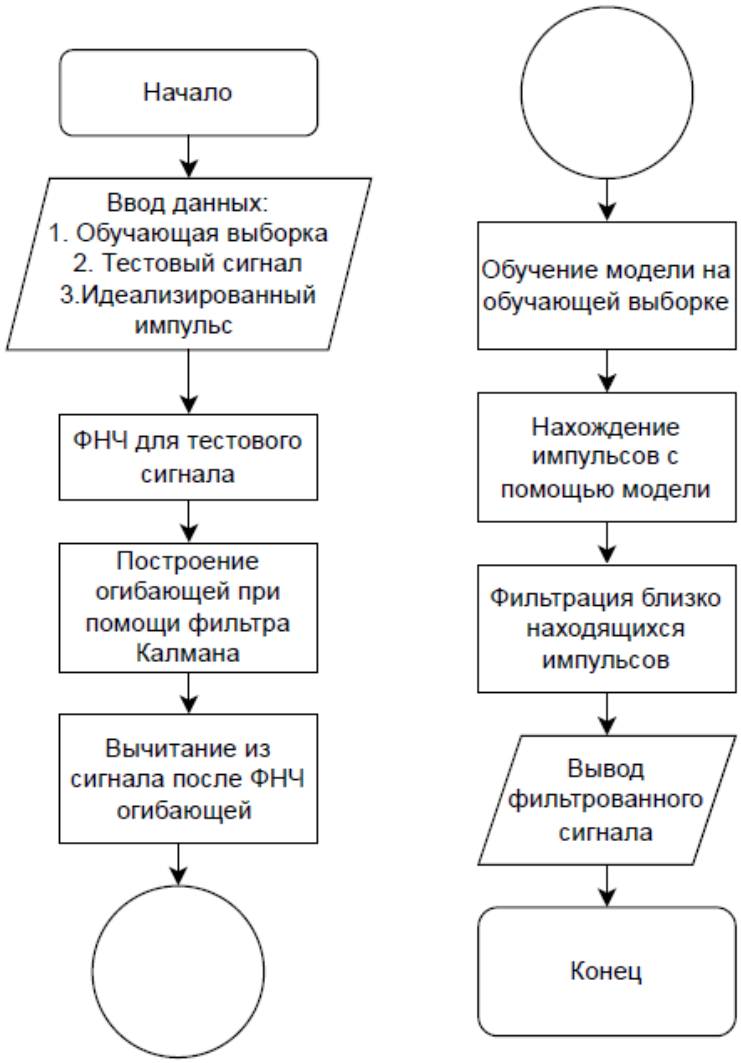



*Рис. 1.* Блок-схема алгоритма

В основе алгоритма лежит использование времяимпульсной модуляции. Алгоритм реализован с помощью программы на языке Python.

Для избавления от высокочастотных помех применяется фильтр низких частот (ФНЧ). На рис. 2 представлен результат фильтрации исходного сигнала с помощью ФНЧ.

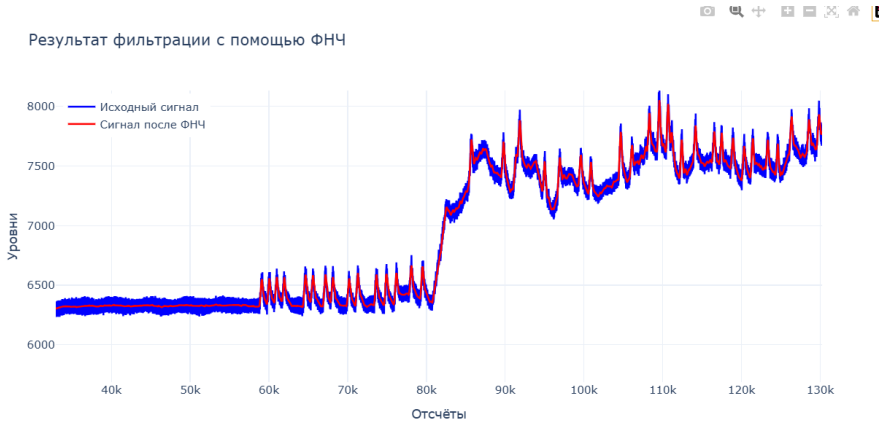



*Рис. 2.* Результат фильтрации ФНЧ

Для выделения огибающей сигнала применяется фильтр Калмана. График, иллюстрирующий работу фильтра, представлен на рис. 3.

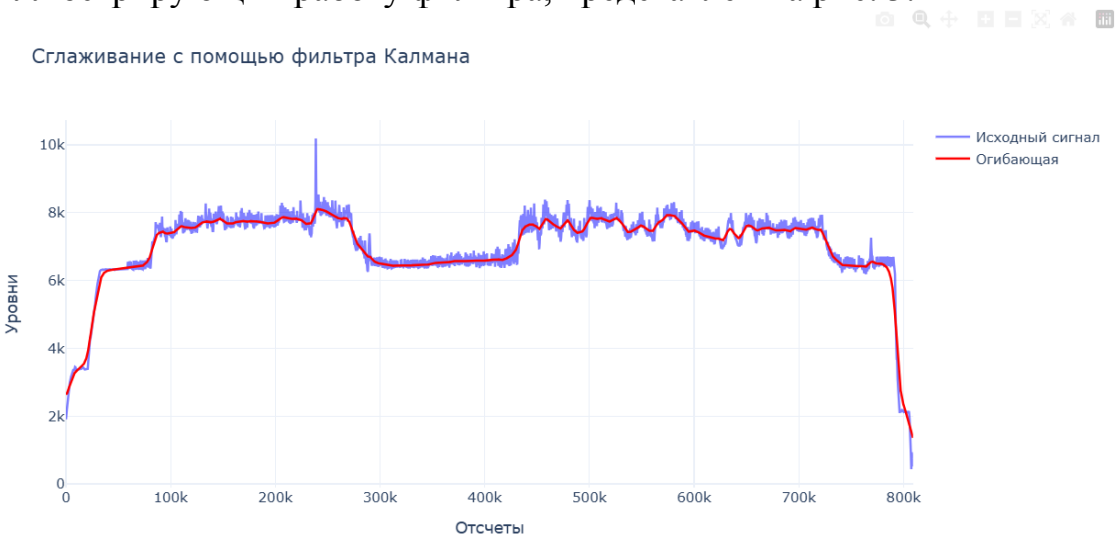



*Рис. 3.* Фильтрация исходного сигнала фильтром Калмана

Далее осуществляется нормализация сигнала по уровню. Происходит вычитание из сигнала после ФНЧ огибающей, найденной с помощью фильтра Калмана. На рис. 4 представлен результат вычитания огибающей из сигнала после ФНЧ.




*Рис. 4.* Результат вычитания огибающей из сигнала после ФНЧ

Обнаружение импульсов осуществляется на основе их формы с применением алгоритма градиентного бустинга, реализованного с помощью библиотеки машинного обучения LightGBM. На рис. 5 представлен фильтрованный сигнал.

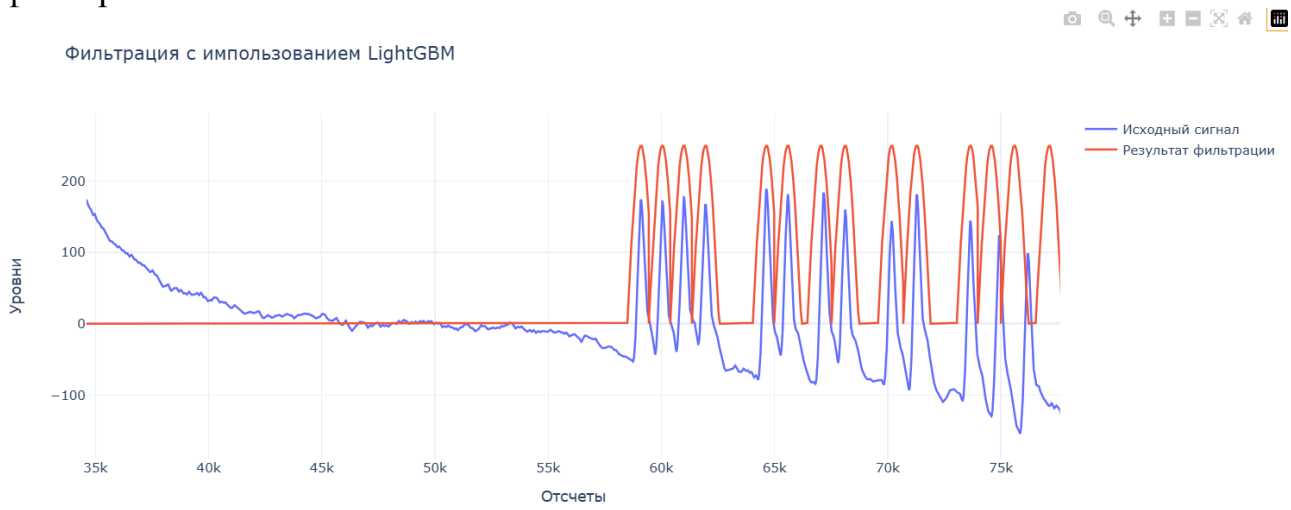



*Рис. 5.* Фильтрованный сигнал

На рис. 6 представлена блок-схема работы модели с использованием LightGBM.

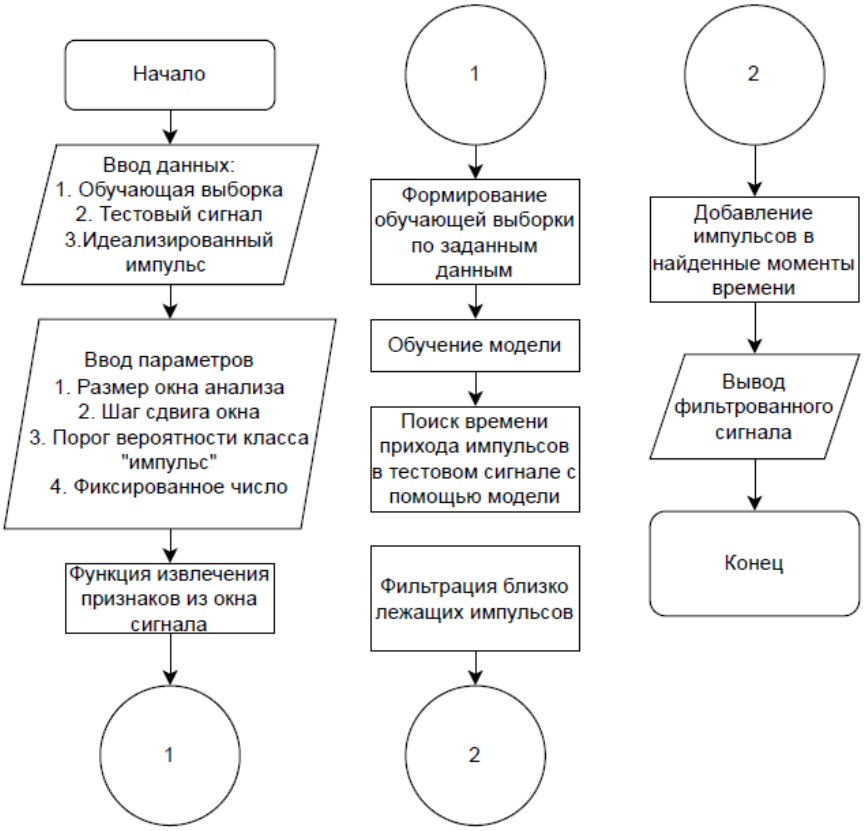



*Рис. 6.* Блок-схема работы модели

Сначала происходит обучение модели на тестовой выборке. Для зашумленного сигнала с известными моментами прихода импульсов выполняется разбиение на окна. На рис. 7 представлена выборка, на которой происходило обучение модели.

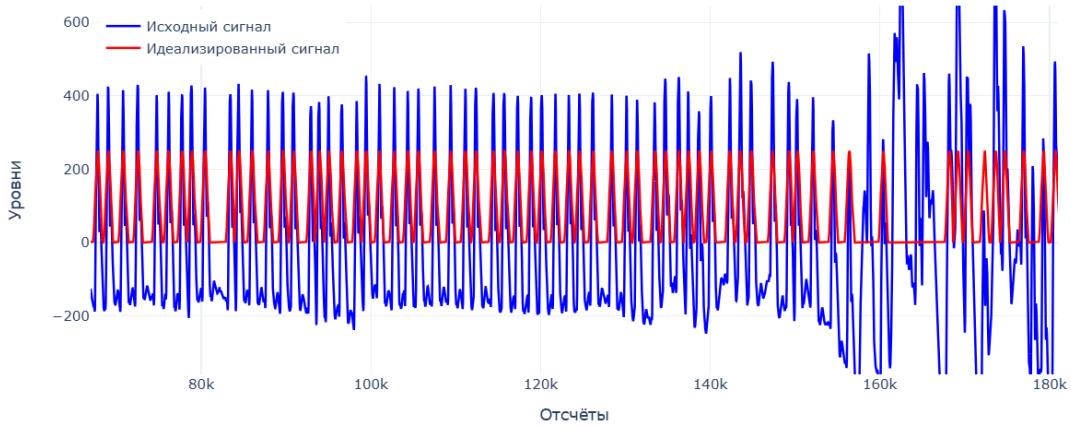



*Рис. 7.* Выборка, на которой происходило обучение модели

Каждому окну присваивается бинарная метка класса в зависимости от наличия там импульса. Форма идеализированного импульса представлена на рис. 8.

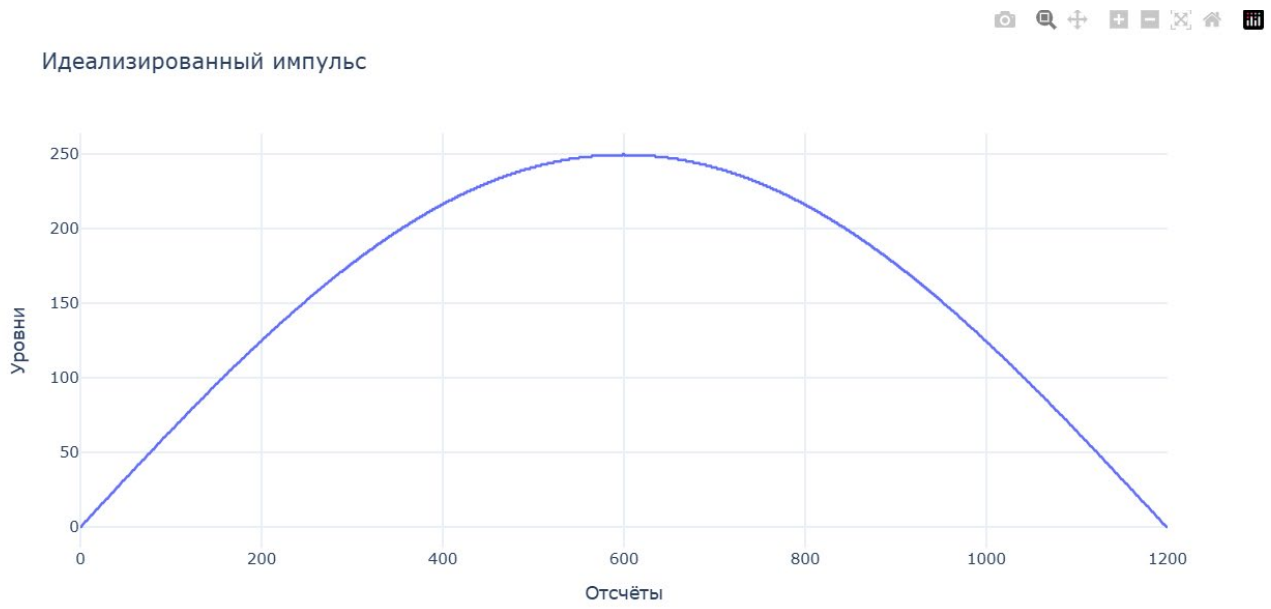



*Рис. 8.* Идеализированный импульс

После обучения осуществляется поиск импульсов в тестовом сигнале. Анализ выполняется аналогично обучающему этапу: сигнал разбивается на перекрывающиеся окна, для каждого окна вычисляется вектор признаков, после чего модель оценивает вероятность принадлежности окна к классу «импульс». На заключительном этапе производится восстановление идеализированного сигнала. Для этого в моменты обнаруженных импульсов в результирующий массив вставляется заранее сформированный шаблон идеализированного импульса.

Проведенный анализ и моделирование подтвердили эффективность предложенного алгоритма поиска импульсов в гидроакустическом канале связи в бурении.

## Библиографический список

1. Li C., Xu Z. A Review of Communication Technologies in Mud Pulse Telemetry Systems: 18 // Electronics. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Т. 12, № 18. С. 3930.

2. Wu J. и др. A continuous phase-frequency modulation technique and adaptive pump noise cancellation method of continuous-wave signal over mud telemetry channel // Digital Signal Processing. 2021. Т. 117. С. 103147.

3. Study on model-based pump noise suppression method of mud pulse signal // Journal of Petroleum Science and Engineering. Elsevier, 2021. Т. 200. С. 108433.

4. Huang L.-F. и др. Underwater noise characteristics of offshore exploratory drilling and its impact on marine mammals // Front. Mar. Sci. Frontiers, 2023. Т. 10.

5. Nadeem K. Estimation of Cutting Forces in Vibration Assisted Drilling System Using Augmented Kalman Filter. 2022.
6. Qin L. и др. Attitude Calculation Method of Drilling Tools Based on Cross-Correlation Extraction and ASRUKF: 9 // Electronics. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. Т. 13, № 9. С. 1707.
7. Kaplun D. и др. Classification of Hydroacoustic Signals Based on Harmonic Wavelets and a Deep Learning Artificial Intelligence System // Applied Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Т. 10, № 9. С. 3097.

© Антипова В.Е., 2026

УДК 004.932

Д.Т. АБДУЛЬМЕНОВ
*abdulmenov.99@mail.ru*
Науч. руководов. – к.т.н., доцент И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ

*Аннотация*. В данной работе рассматривается разработка лабораторного стенда для регистрации, обработки и управления акустическими данными на базе микроконтроллера ESP32 и цифрового микрофона INMP441. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания доступных и универсальных методов цифровой обработки сигнала.

*Ключевые слова*: акустические данные, ESP32, INMP441, интернет вещей, анализ сигналов, лабораторный стенд.

Современные системы обработки акустических данных активно применяются в промышленности, медицине, экологии и системах безопасности. Их развитие связано с распространением интернета вещей, где устройства способны обучаться и анализировать данные в реальном времени. Основное преимущество акустических данных заключается в том, что они могут служить дополнительным каналом для получения информации о состоянии объектов и окружающей среды, часто в тех случаях, когда другие сенсоры не могут обеспечить достаточную точность или чувствительность.

В ходе анализа предметной области была выявлена проблема отсутствия компактных, доступных и воспроизводимых лабораторных комплексов для изучения акустических процессов.

Основные трудности существующих решений:

- высокая стоимость оборудования
- сложность настройки
- ограниченные возможности работы в реальном времени

В связи с этим была сформулирована научно-техническая задача: разработать лабораторный стенд, обеспечивающий захват, обработку, анализ и передачу акустических сигналов с использованием микроконтроллера ESP32 и цифрового микрофона INMP441.

При выборе элементов для лабораторного стенда был произведен анализ и сравнение существующих вариантов, подходящих для реализации. В качестве основы системы был выбран микроконтроллер ESP32, который сочетает: достаточную производительность, низкое энергопотребление, встроенные модули Wi-Fi и Bluetooth, поддержку интерфейса I2S. Это делает его оптимальным для задач обработки аудиосигналов в реальном времени.

В качестве датчика использован цифровой MEMS-микрофон INMP441, обладающий: высокой чувствительностью, широким частотным диапазоном, цифровым интерфейсом передачи данных. Такая комбинация обеспечивает точный захват акустических сигналов и их дальнейшую обработку. Структурная схема стенда представлена на

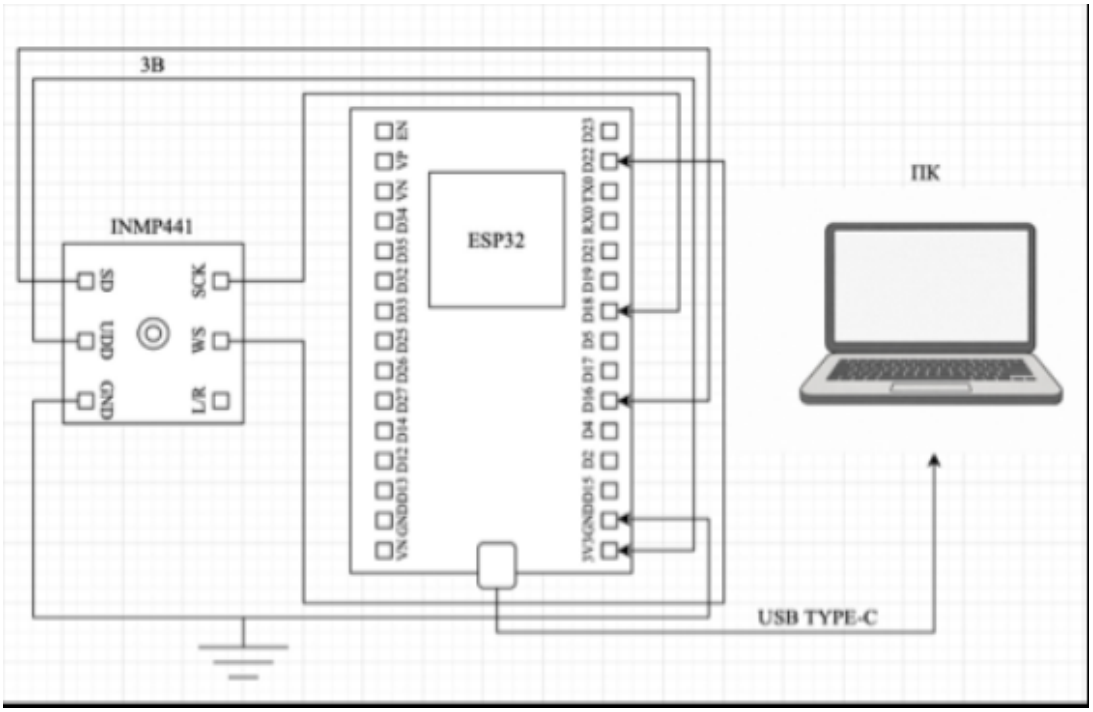



*Рис. 1.* Структурная схема лабораторного стенда

Разработанный лабораторный стенд представляет собой аппаратно-программный комплекс, включающий микроконтроллер. Структура системы сделана так, чтобы обработка звукового сигнала происходила поэтапно. Сначала микрофон улавливает звук и передает его на микроконтроллер. Так как сигнал не всегда приходит чистым и могут появляться разные помехи, сначала выполняется его предварительная обработка. На этом этапе убирается часть шумов, чтобы данные были более пригодны для дальнейшей работы. После этого из сигнала выделяется нужная информация, которая потом используется для анализа. Результаты обработки выводятся в удобном виде, чтобы можно было наблюдать за изменениями сигнала. Программная часть была написана в

Arduino IDE, так как эта среда достаточно простая и часто используется при работе с микроконтроллерами. Передача данных с микрофона выполняется через интерфейс I2S. Программа в процессе работы постоянно считывает входные данные, обрабатывает их и выводит результат практически сразу. Также в программе реализован расчет некоторых основных параметров сигнала, например амплитуды и среднего значения [1]. Алгоритм работы системы состоит из нескольких этапов. Сначала происходит начальная настройка микроконтроллера и подключенных модулей. Потом начинается считывание сигнала с микрофона. После этого данные проходят обработку, так как без этого анализ мог бы быть не совсем точным из-за шумов. Далее вычисляются нужные параметры сигнала, и уже на основе этих данных выполняется анализ. В конце результаты отображаются пользователю. Сначала производится считывание массива аудиоданных, поступающих с микрофона. Затем выполняется анализ полученного массива с целью определения максимального значения сигнала. После этого производится вычисление среднего значения, которое используется для дальнейшей визуализации.

Практическая часть была реализована в виде трех лабораторных работ, которые позволяют последовательно изучать методы обработки акустических сигналов. Первая лабораторная работа направлена на формирование и обучение системы распознавания голосовых команд. В рамках данной работы осуществляется сбор и разметка аудиоданных, а также обучение модели для распознавания простых речевых сигналов. Вторая лабораторная работа посвящена обнаружению аномальных звуков. Здесь реализуется подход, позволяющий отличать нормальные звуки от отклонений, что может применяться, например, для диагностики оборудования. Третья лабораторная работа связана с анализом целостности и подлинности речевого сигнала [2], что актуально для задач безопасности и защиты от подделки аудиоданных. Поэтому такой вариант работы позволяет перейти от базовой задачи к более сложной и дает понимание, как обрабатывается звук.

Новизна данной научной работы показана в разработке системы, которая позволяет интегрировать данные благодаря аппаратной части. Данная система обеспечивает обработку акустических данных на устройстве в реальном времени [1, 2]. И в данной работе весь процесс вычисления происходит на микроконтроллере, у которого ограниченные ресурсы, при этом ничем не хуже вычислительных платформ. Это позволяет снизить стоимость разработки сделать ее доступной.

Данный стенд будет удобным инструментом для обучения и проведения различных исследований и проектов. Его практическая значимость проявляется в разнообразии областей использования. В образовании он может применяться для проведения лабораторных работ, к примеру по цифровой обработке сигнала и освоения технологии интернета вещей. В научной области спектр его возможностей шире и масштабнее.

Также разработанный стенд может использоваться в задачах прикладного типа. К примеру, в системах мониторинга оборудования позволит выявить

неисправности на ранней стадии. Возможна также реализация для распознавания аномальных звуков. Также его можно использовать как основу для разработки систем распознавания голосовых команд и др.

Для реализации проекта использовались доступные компоненты, за счет этого стоимость вышла минимальная. Конструкция не является сложной в сборке и реализуема в короткие сроки. При необходимости стенд можно дорабатывать и добавлять новые функции.

По итогу проведенной работы был создан лабораторный стенд, позволяющий работать с акустическими данными в реальном времени. Стенд принимает, обрабатывает и отправляет данные. Он подход как для учебных процессов, так и для различных экспериментов. Можно сделать вывод, что даже не имея дорогостоящих компонентов, можно реализовать работающую систему.

**Библиографический список**

1. Верзун Н.А., Колбанев М.О., Салиева А.Р. Разработка и исследование метода обучения с подкреплением для акустической диагностики промышленного оборудования // НТВ ИТМО. – 2025. – №5. – С. 961–970.

2. Чучупал В.Я., Акустическое и языковое моделирование в сквозных системах распознавания речи // Цифровая обработка сигналов. – 2020. – №1. – С. 34–38.

© Абдульменов Д.Т., 2026

УДК 004.415.25

О.М. ХАКИМОВ
*Oleg678_08@mail.ru*
Науч. руководов. – д-р. техн. наук, проф. А.Х. СУЛТАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## О МАРШРУТИЗАЦИИ ДАННЫХ В СЕТЯХ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА

*Аннотация*. В рассматривается маршрутизация в сетях когнитивного радио групп БПЛА (MANET) с нестабильными каналами. Предложено свести задачу к lifelong MAPF на графе, где агентами выступают пакеты данных, а веса ребер динамически определяются пропускной способностью радиоканалов, зависящей от прогноза движения узлов. Подход позволяет учитывать ограничения на занятость ребер. Отмечена NP-трудность и перспективность разработки алгоритмов на основе эвристик и обучения с подкреплением.

*Ключевые слова*: беспилотные летательные аппараты (БПЛА); мобильные ad hoc сети (MANET); когнитивное радио; маршрутизация; пропускная способность каналов; динамический граф; обучение с подкреплением; эвристическое планирование; непрерывный многоагентный поиск пути.

В настоящее время стремительно развиваются технологии беспилотного транспорта, в частности, групповое применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Группы БПЛА могут выполнять различные производственные задачи, такие, как мониторинг состояния крупных и высотных объектов, охрана территории, переноска небольших грузов. Группы устройств могут перемещаться в различных погодных условиях, отдельные устройства могут находиться на различных расстояниях друг от друга, а также могут быть разделены препятствиями. Эти особенности влияют на качество связи между устройствами и пропускную способность каналов передачи между ними. Перспективным представляется применение технологий когнитивного радио (Cognitive Radio, CR), которые позволяют динамически использовать спектр, повышая эффективность в условиях нестабильной связи.

С точки зрения сетевых технологий множество БПЛА образует беспроводную сеть, в которой возможна как однохоповая (между двумя соседними устройствами, или между устройством и базой) так и мультихоповая (в том случае, если одно устройство передает данные между двумя другими, например, между одним из БПЛА и базой) передача данных. Такие сети можно отнести к категории Mobile Ad Hoc Network (MANET). Управление информационными потоками в сетях Cognitive Radio MANET является научной задачей, рассмотренной в ряде работ [1,2]. В сети беспилотных аппаратов узлы движутся с большими скоростями, но при этом траектории устройств определяются выполняемой миссией и могут быть спрогнозированы. Это обуславливает перспективность разработки методов маршрутизации, учитывающих прогноз расположения узлов и пропускную способность каналов связи между ними.

Такая маршрутизация близка к постановке непрерывного многоагентного поиска пути (lifelong multiagent path finding, lifelong MAPF). Данная постановка обычно рассматривается в контексте робототехники [3], но имеет абстрактный характер, позволяющий адаптировать ее к другим задачам поиска пути на графе. D узлах заданного графа находится множество агентов. В классической трактовке под агентами понимаются роботы, при решении задач маршрутизации под агентами подразумеваются пакеты данных. Агенты могут перемещаться между узлами графа по связывающим их ребрам, при этом задаются ограничения:

- Перемещение по ребру занимает определенное время;
- По одному ребру может одновременно перемещаться не более одного агента.

С течением времени на графе появляются новые задания по перемещению агентов между заданными начальными и конечными узлами. В

робототехнике предполагается, что множество агентов зафиксировано и каждый агент начинает выполнение новой задачи в том узле, в котором завершил предыдущую. Для маршрутизации такого ограничения не задается, новые агенты могут появляются на произвольных узлах. Задача lifelong MAPF состоит в следующем: спланировать пути каждого агента так, чтобы минимизировать заданный функционал (обобщенное время движения агентов, обобщенную длину пути агентов и т.п.) на всем графе в течение рассматриваемого промежутка времени. Задача является NP-трудной, для нее разработаны различные подходы, основанные на эвристическом планировании и на обучении с подкреплением [3].

Применение постановки lifelong MAPF к задаче маршрутизации в сети БПЛА является перспективным направлением исследований. Исследования в этой области предполагают разработку алгоритмов, учитывающих особенности сетей БПЛА, в частности изменяющиеся веса путей между ребрами графа.

**Библиографический список**

1. Sarkar N. I., Ali M. J. A study of MANET routing protocols in heterogeneous networks: a review and performance comparison //Electronics. – 2025. – Т. 14. – №. 5. – С. 872.

2. Tran T. N. et al. A new deep Q-network design for QoS multicast routing in cognitive radio MANETs //IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 152841-152856.

3. Skrynnik A. et al. Learn to follow: Decentralized lifelong multi-agent pathfinding via planning and learning //Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. – 2024. – Т. 38. – №. 16. – С. 17541-17549.

© Хакимов О.М., 2026

УДК 621.376.9

Р.О. САЛЬНИКОВ
*kosshak17@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. И.К. МЕШКОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## СНИЖЕНИЕ ПИК-ФАКТОРА СИГНАЛА В КАНАЛАХ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА НА БАЗЕ ГИБРИДНЫХ СЕТЕЙ 5G/6G

*Аннотация*. Рассмотрен метод снижения отношения пиковой мощности к средней для каналов управления беспилотными летательными аппаратами в гибридных сетях связи. Предложен усовершенствованный формирующий фильтр, локально применяющий оконную функцию к переходным зонам импульсной характеристики. Имитационное моделирование в условиях многолучевого распространения и доплеровского сдвига подтвердило снижение пик-фактора на 0,5-2 дБ без деградации помехоустойчивости.

*Ключевые слова*: БПЛА, DFT-s-OFDM, пик-фактор, формирующая фильтрация, EOBTRC, гибридные сети, энергоэффективность.

Интеграция беспилотных летательных аппаратов в архитектуру сетей пятого и шестого поколений способствует формированию гибридных сетей связи, которые объединяют наземный и космический сегменты [1]. Беспилотные платформы в гибридных сетях могут выступать как промежуточным звеном между спутниковой группировкой и наземными абонентами, так и самостоятельными узлами сети, обеспечивая мониторинг окружающей среды, инспекцию критической инфраструктуры и оперативное развертывание телекоммуникационных услуг. Однако функционирование в условиях динамического изменения геометрии радиолинии, многолучевого распространения и ограниченного бортового энергопотребления требует оптимизации физических уровней передачи. Традиционные сигналы на базе ортогонального частотного мультиплексирования характеризуются высоким отношением пиковой мощности к средней, что вынуждает бортовые усилители мощности работать с значительным запасом по линейности. Это сокращает время автономного полета, что является критическим ограничением в контексте идеи использования БПЛА в качестве промежуточных узлов связи [2].

Технология DFT-s-OFDM, принятая для восходящего канала стандартов 5G, обеспечивает снижение пик-фактора за счет предварительного дискретного преобразования Фурье [3]. Тем не менее, в условиях воздушных каналов связи, характеризующихся значительными доплеровскими сдвигами и частотно-селективными замираниями, требуется дополнительная оптимизация спектрального хвоста и энергетических характеристик сигнала [4].

В работе рассматривается метод совместного применения гибких защитных интервалов и усовершенствованной формирующей фильтрации для оптимизации параметров сигнала в каналах управления беспилотными аппаратами. Формирующая фильтрация в современных системах традиционно направлена на подавление межканальной интерференции, однако линейное сверточное преобразование неизбежно модифицирует огибающую сигнала во временной области. Классические фильтры приподнятого косинуса и корня из приподнятого косинуса обеспечивают компромисс между межсимвольной интерференцией и шириной спектра, но недостаточно эффективны для целенаправленного сглаживания пиковых выбросов мощности в условиях замираний [5].

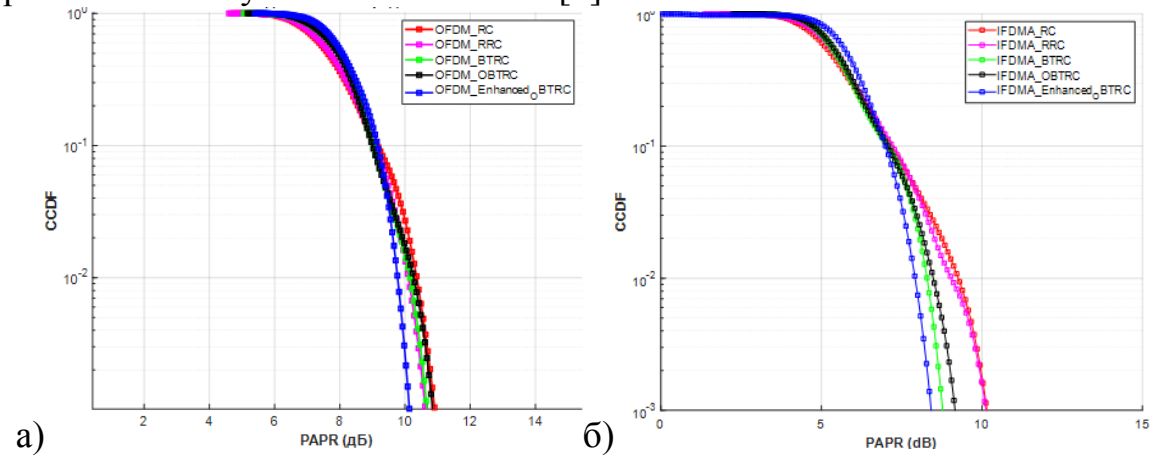
Семейство фильтров «Better than Raised Cosine» и его оптимизированная модификация разработаны для улучшения подавления интерференции при частотном рассогласовании за счет более крутого спада импульсной характеристики [6].

В рамках исследования рассматривается вариант формирующего фильтра Enhanced OBTRC, в котором к переходным зонам импульсной характеристики локально применяется оконная функция Тьюки [7]. В отличие от глобального

применения оконной функции, затрагивающего весь символ, локальное сглаживание сохраняет плоскую центральную часть импульса, критичную для ортогональности поднесущих, сглаживая боковые паразитные частотные составляющие сигнала [6].

Параметр сглаживания подбирается итеративно под конкретный сценарий распространения, обеспечивая адаптивный баланс между уровнем пик-фактора и устойчивостью к доплеровскому сдвигу. В контексте управления каналов управления БПЛА, характеризующихся динамичным изменением траектории полета и скорости относительно базовой станции, архитектура предложенного формирующего фильтра должна сделать формирование огибающей управляющего сигнала предсказуемым.

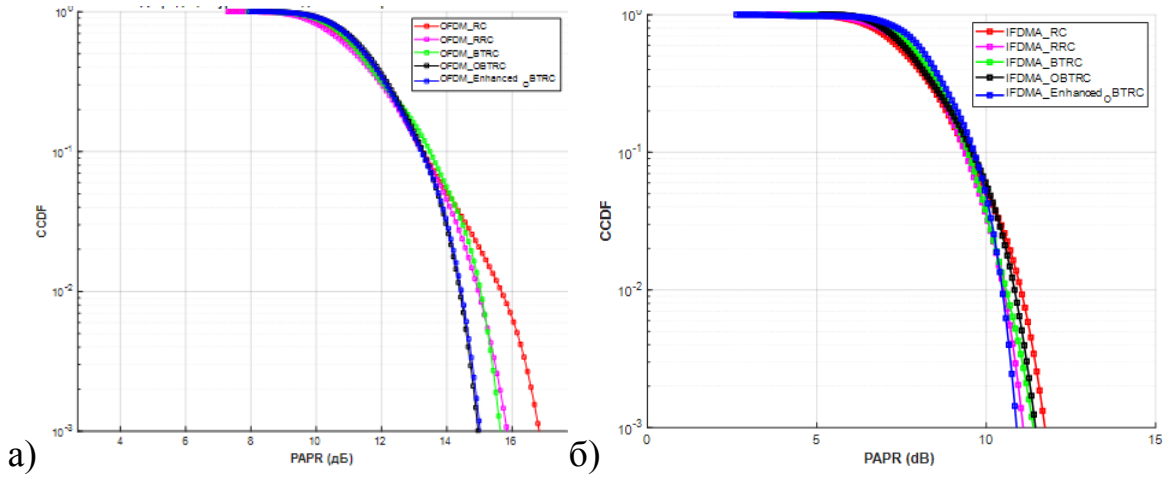
В рамках работы проведено имитационное моделирование в MATLAB. Среда – максимально приближенная к условиям каналов управления БПЛА в диапазоне 2,4 ГГц: размер БПФ – 2048, модуляция QAM-16, защитный интервал в 25% от длины символа. Моделировались как сценарии радиоуправления с прямой видимостью, так и ретрансляции через низкоорбитальный спутниковый сегмент [4].




а) б)

*Рис. 1.* Пик-фактор на передатчике для а) OFDM и б) IFDMA

На рисунках 1 (а,б) видно, что для технологий OFDM и IFDMA применение фильтра EOBTRC снижает вероятность превышения пик-фактором уровня в 9 дБ на 1-2 порядка. Отметим, что такое снижение важно с точки зрения требований к схемотехнике оборудования, используемого в БПЛА, и способствует повышению энергоэффективности устройств.




а) б)

*Рис. 2.* Деградация пик-фактора для а) OFDM в канале Рэлея и б) IFDMA в канале Райса

Из рисунков 2 (а,б) видно, что использование фильтра EOBTRC также помогает бороться с влиянием канала распространения на деградацию пик-фактора.

В канале Рэлея (рис. 2(а)), моделирующем условия плотной городской застройки и экранирования, применение предложенного фильтра наряду с OBTRC снижает пик-фактор на 1,5-2 дБ (при вероятности $10^{-2}$) для технологии OFDM.

В канале Райса (рис. 2(б)), соответствующем пригородной зоне с наличием прямой видимости, выигрыш незначительный, составляет порядка 0.5 дБ для технологии IFDMA.

Практическая значимость метода заключается в том, что его можно интегрировать в бортовые модемы беспилотных аппаратов без модификации аппаратной части устройств. Снижение пик-фактора позволяет снизить резерв по выходной мощности усилителя на 15-20 %. Это повышает энергоэффективность и продлевает время полета.

Основное ограничение – вычислительная нагрузка при подборе параметра сглаживания в реальном времени, для реализации требуются ПЛИС или специализированные цифровые сигнальные процессоры. Логичным продолжением может стать разработка многокритериального контроллера, который в реальном времени будет подбирать конфигурацию фильтрации и тип защитного интервала на основе оценки текущего отношения сигнал/шум и доплеровского профиля канала, используя нейронные сети [8].

Предложенный метод снижения пик-фактора на основе усовершенствованной формирующей фильтрации и гибких защитных интервалов обеспечивает эффективную оптимизацию энергетических характеристик сигналов DFT-s-OFDM для каналов управления беспилотными аппаратами. Моделирование подтвердило снижение пик-фактора на 0,5–2 дБ. Результаты готовы к внедрению в проектируемые бортовые радиомодемы и могут быть использованы при стандартизации физических уровней для

сценариев прямого взаимодействия с беспилотными платформами и неназемной ретрансляции.

**Библиографический список**

1. 3GPP TR 38.811 V17.0.0. Study on NR to support non-terrestrial networks (Release 17). – 2022.

2. Cho Y. S. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. – IEEE Press, 2010. – 512 p.

3. Berardinelli G. Generalized DFT-s-OFDM waveforms without cyclic prefix // IEEE Access. – 2017. – Vol. 6. – P. 4677-4689.

4. Baeza V. M. et al. An overview of channel models for NGSO satellites // 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference. – IEEE, 2022. – P. 1-6.

5. Lee S. J., Beaulieu N. C. Performance comparison of non-data-aided symbol timing-error detection for the raised-cosine and "better than" raised-cosine pulses // IEEE Transactions on Communications. – 2009. – Vol. 57. – № 5. – P. 1261-1264.

6. Assimonis S. D. et al. Optimized "better than" raised-cosine pulse for reduced ICI in OFDM systems // 2010 17th International Conference on Telecommunications. – IEEE, 2010. – P. 249-252

7. Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform // Proceedings of the IEEE. – 1978. – Vol. 66. – № 1. – P. 51-83.

8. Sultana T., Shawkat S. A. Employment of pulse shaping techniques for efficient PAPR reduction in OFDM system // 2014 17th International Conference on Computer and Information Technology. – IEEE, 2014. – P. 482-487.

© Сальников Р.О., 2026

## СЕКЦИЯ 3.5 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.313.84

А.О. АХМАДЕЕВ
*ahmadeeval001@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент М.Б. ГАРЕЕВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

*Аннотация*. В работе проведён анализ магнитных материалов, применяемых в системах возбуждения интегрированных стартер-генераторов (ИСГ). Рассмотрены физические и температурные характеристики постоянных магнитов на основе NdFeB, SmCo и ферритов, а также их влияние на эффективность и надёжность электрических машин. Особое внимание уделено сравнению магнитных свойств и технологических особенностей их производства.

*Ключевые слова*: интегрированный стартер-генератор, постоянные магниты, NdFeB, SmCo, феррит, система возбуждения, магнитные материалы, температурная стабильность, редкоземельные сплавы.

**Введение**

Современные электрические и гибридные транспортные системы предъявляют всё более высокие требования к эффективности и компактности электрических машин. Одним из наиболее перспективных направлений их развития являются интегрированные стартер‑генераторы (ИСГ), совмещающие функции стартера и генератора в едином агрегате. Ключевую роль в таких устройствах играет система возбуждения, создающая магнитное поле синхронной машины. Применение постоянных магнитов позволяет повысить энергетическую эффективность, снизить потери и увеличить удельную мощность установки [1]. При этом выбор магнитного материала становится определяющим фактором надёжности и долговечности всей системы.

**Магнитные материалы и их температурные характеристики**

Для систем возбуждения интегрированных стартер‑генераторов используются различные типы постоянных магнитов, отличающиеся по составу, уровню магнитной энергии и температурной стабильности. Наибольшее распространение получили редкоземельные магниты на основе сплавов неодим‑железо‑бор (NdFeB) и самарий‑кобальт (SmCo), а также ферритовые магниты [2, 3]. NdFeB‑магниты обладают высокой плотностью

магнитной энергии, что позволяет уменьшить массу и размеры электрических машин, однако они чувствительны к повышенной температуре и требуют защиты от коррозии [4]. SmCo‑магниты более устойчивы при нагреве до 300 °C и отличаются стабильностью свойств во времени [5]. Ферритовые магниты, хотя и имеют меньшую плотность магнитной энергии, широко применяются благодаря низкой стоимости, коррозионной стойкости и высокой температурной стабильности [6].

Сравнительные характеристики основных типов магнитных материалов приведены в таблице 1.

*Таблица 1*

Сравнительный анализ магнитных материалов

| Материал | *Br*, Тл | *Hc*, кА/м | (*BH*)max, кДж/м³ | *T*□ (°C) | Раб. темп. (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| NdFeB | 1.1–1.4 | 800–2000 | 200–440 | 310–400 | до 200 |
| SmCo | 0.9–1.1 | 600–1000 | 120–200 | 700–850 | до 300 |
| Феррит | 0.4 | 250–350 | 25–40 | 450 | до 200 |

Температурная устойчивость магнитных материалов оказывает существенное влияние на стабильность работы ИСГ. На рисунке 1 показана зависимость максимальной плотности магнитной энергии (BHmax) от температуры для различных магнитов.

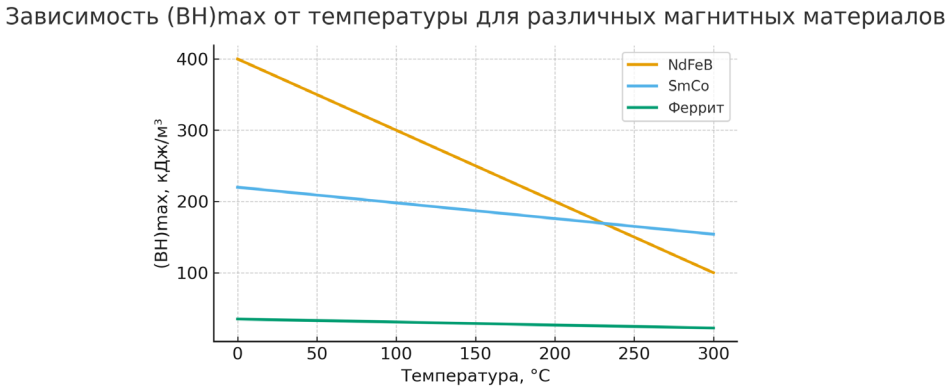



*Рис. 1.* Зависимость (BH)max от температуры для различных магнитных материалов

Как видно из рисунка 1, SmCo‑магниты сохраняют до 90 % магнитной энергии при нагреве до 250 °C, в то время как NdFeB теряют часть свойств уже при 150 °C [7]. Ферритовые магниты демонстрируют сравнительно низкие значения (BH)max, но отличаются стабильностью параметров в широком температурном диапазоне.

**Производители магнитных материалов**

Производство магнитных материалов активно развивается как в России, так и за рубежом. Среди российских предприятий можно выделить АО

«НеоМАГ» (Томск), АО «Магнетон» (Санкт‑Петербург), АО «Контакт» (Калуга) и институт ИМЕТ РАН [5, 6]. Они ведут работы по созданию сплавов NdFeB и SmCo, в том числе с пониженным содержанием диспрозия. Однако отечественная отрасль ограничена зависимостью от импорта редкоземельных порошков. Китайские компании, напротив, занимают лидирующие позиции благодаря контролю над сырьевой базой и применению технологий диффузии границ зёрен (GBD) [2, 3]. Крупнейшими производителями являются Ningbo Tongchuang Magnetic Materials, HGT Advanced Magnets и Zhaobao Magnet, отличающиеся высокой точностью и стабильностью продукции.

**Заключение**

Редкоземельные магниты NdFeB и SmCo являются основой систем возбуждения интегрированных стартер‑генераторов. NdFeB обеспечивает максимальную энергонасыщенность, тогда как SmCo отличается лучшей термостабильностью. Ферритовые материалы, несмотря на меньшие показатели (BH)max, остаются востребованными благодаря низкой стоимости и стабильности характеристик. Совершенствование состава сплавов, улучшение технологии производства и развитие отечественной базы позволят повысить эффективность и надёжность электрических машин нового поколения.

## Библиографический список


1. Stanford Magnets. NdFeB Magnets Temperature Ratings [Электронный ресурс]. – URL: https://www.stanfordmagnets.com/ndfeb-magnets-temperature-ratings.html (дата обращения: 21.10.2025).
2. Ningbo Tongchuang Magnetic Materials Co., Ltd. Top China NdFeB Magnet Manufacturers [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ndmagnets.com (дата обращения: 21.10.2025).
3. Zhaobao Magnet Co., Ltd. Permanent Magnet Manufacturers in China 2025 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.zhaobao-magnet.com (дата обращения: 22.10.2025).
4. Arnold Magnetic Technologies. Permanent Magnet Materials Data Sheet [Электронный ресурс]. – URL: https://www.arnoldmagnetics.com (дата обращения: 23.10.2025).
5. ИМЕТ РАН. Разработка редкоземельных магнитов NdFeB с низким содержанием Dy. – Москва, 2024.
6. АО «НеоМАГ». Каталог продукции. – Томск, 2023.
7. Magnetstek. NdFeB Temperature Ratings and Curie Point [Электронный ресурс]. – URL: https://magnetstek.com/custom-neodymium-magnets/custom-neodymium-magnets/ndfeb-temperature-ratings/ (дата обращения: 23.10.2025).
8. Alliance Organization. Samarium Cobalt Magnets Properties [Электронный ресурс]. – URL: https://allianceorg.com/magnetic-materials/samarium-cobalt-magnets/ (дата обращения: 21.10.2025).


© Ахмадеев А.О., 2026

УДК 621.316

А.Р. АХМЕТШИН
*akmetshin04@mail.ru*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Р.К. ФАТТАХОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# АВТОМАТИКА ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ С АДАПТИВНЫМИ УСТАВКАМИ ПО ТОКУ

*Аннотация.* В статье рассматривается принцип действия автоматики ограничения перегрузки оборудования. Описываются проблемы и ограничения традиционной методики выбора фиксированных сезонных уставок. Обосновывается необходимость применения адаптивных уставок по току. Описывается практическая реализация данной технологии.

*Ключевые слова:* Автоматика ограничения перегрузки, адаптивные уставки, противоаварийная автоматика, токовая нагрузка, охлаждение проводов, пропускная способность, сезонная перестройка уставок.

В связи с ростом энергопотребления электрические сети всё чаще работают в режимах, близких к пределу пропускной способности. Зачастую темпы строительства и реконструкций объектов электроэнергетики отстают от темпов роста нагрузки. В таких условиях элементы электрической сети могут оказываться под воздействием токов, превышающих длительно допустимые значения. Превышение длительно допустимых токовой нагрузки в проводах линий электропередачи (ЛЭП) и обмотках силовых трансформаторов приводит недопустимому нагреву, ускоренному старению изоляции и повреждению. Для предотвращения и ликвидации недопустимой перегрузки в нормальных и послеаварийных режимах работы энергосистемы используется автоматика ограничения перегрузки оборудования (АОПО).

АОПО представляет собой устройство противоаварийной автоматики (ПА), предназначенное для выявления недопустимой по величине и длительности токовой нагрузки ЛЭП и электросетевого оборудования и реализации управляющих воздействий, направленных на ее ликвидацию. Структура АОПО представляет собой три функциональных блока (рис. 1): пусковые органы, логическая часть и исполнительные органы. Пусковые органы выполняют измерение тока в защищаемом элементе и сравнивают его с заданным значением уставки. При превышении током уставки срабатывания выполняется передача сигнал в логический блок, который запускает алгоритм действий автоматики, реализуемый исполнительными органами.

Устройства АОПО, как правило, содержат от трех до четырех ступеней, каждая из которых срабатывает при определенном значении тока и имеет свою выдержку времени. Первая ступень выполняется с действием на сигнал по

факту превышения длительно допустимой токовой нагрузки. Вторая ступень запускается при выходе тока за предел длительно допустимой токовой нагрузки и истечения заданной выдержки времени и осуществляет формирование и выдачу команд на реализацию требуемых управляющих воздействий. Третья ступень запускается при превышении током аварийно допустимой токовой нагрузки и характеризуется меньшей выдержкой и более интенсивными управляющими воздействиями. Четвертая ступень служит для отключения защищаемого элемента электрической сети и срабатывает в случае, если управляющие воздействия второй или третьей ступени оказались недостаточными для ликвидации перегрузки.




*Рис. 1*. Структурная схема АОПО

Принципиальным ограничением традиционной методики выбора для АОПО уставок по току является то, что расчет как длительно, так и аварийно допустимых токовых нагрузок выполняется для наихудших условий охлаждения провода. Температура окружающего воздуха принимается максимальной для данного сезона, а скорость ветра — равной нулю. В реальности же большую часть времени метеоусловия являются более благоприятными. Температура воздуха ниже, а поток ветра существенно увеличивает охлаждение проводов. Стоит отметить, что важным фактором в охлаждении проводника является еще и направление ветра. Максимальный охлаждающий эффект достигается при перпендикулярном обдуве линии, минимальный — при продольном. Использование фиксированных уставок в таких случаях приводит к неоправданному ограничению пропускной способности. Для устранение указанного недостатка возможно применение адаптивных уставок по току. Такие уставки не задаются жестко на каждый сезон, а рассчитываются с использованием данных о температуре окружающего воздуха, скорости и направления ветра, поступающих в режиме реального времени.

Реализация адаптивных уставок требует оснащения ЛЭП метеодатчиками, осуществляющими непрерывное измерение температуры окружающего воздуха, скорости и направления ветра. Измеренные данные передаются по каналам телемеханики непосредственно в устройство АОПО, в котором на основании тепловой модели провода конкретной марки и сечения выполняется вычисление актуального значения предельно допустимого тока, при котором температура провода не превысит нормы. Полученное значение выставляется в логическом блоке в качестве переменной уставки, актуальной для текущих погодных условий. Размещать метеодатчики необходимо на пролетах ЛЭП, ограничивающих пропускную способность по условиям

охлаждения. Такими участками являются закрытые от ветров застроенные территории, лесные просеки с пониженной скоростью воздушных потоков.

Внедрение АОПО с адаптивными уставками позволяет не только увеличить пропускную способность линии при благоприятных метеоусловиях, но и увеличивает надежность энергосистемы при внезапном их ухудшении. Дополнительным преимуществом реализации данной технологии является возможность ведения архива измеренных метеопараметров и расчетных значений уставок с привязкой ко времени. Такой архив позволяет выполнять анализ работы ПА, определить точность заложенной тепловой модели и, при необходимости, выполнять ее корректировку. Так же стоит отметить, что данная технология является решение организационно-технической проблемы, связанной с сезонной перестройкой параметров устройств АОПО. При использовании фиксированных уставок, диспетчерские центры и персонал сетевых организаций вынуждены как минимум дважды в год в плановом порядке выполнять массовую смену уставок в терминалах автоматики. Данные работы производятся в сжатые сроки, что создает дополнительную нагрузку на персонал и увеличивает риски ошибок при вводе уставок.

Таким образом, автоматика ограничения перегрузки оборудования с адаптивными уставками по току представляет собой необходимый этап в развитии систем ПА. Отказ от фиксированных сезонных уставок в пользу динамических, пересчитываемых в реальном времени на основе фактических метеоданных, позволяет увеличить использование пропускной способности существующей электрической сети в те периоды, когда внешние условия это допускают, повысить надежность защиты оборудования в моменты неблагоприятных погодных отклонений, а также решает давнюю организационно-техническую проблемы сезонной перестройки параметров устройств АОПО. В условиях роста нагрузок и отставания темпов сетевого строительства данная технология становится не просто перспективной функцией, а важным инструментом эффективного управления режимами работы энергосистемы.

**Библиографический список**

1. ГОСТ Р 59384–2025. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования. – Москва: Стандартинформ, 2025. – 50 с.

2. СТО 56947007–29.240.55.143–2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. – Москва : ОАО «ФСК ЕЭС», 2013. – 42 с.

3. Карева, С.Н. Современный подход к созданию автоматики ограничения перегрузок воздушных линий / С.Н. Карева, А.В. Кащеев и др. //

Функционирование и развитие электроэнергетики в эпоху цифровизации – Москва: Изд-во МЭИ, 2021. – С. 4–9.

© Ахметшин А.Р., 2026

УДК 621.313

И.В. БАБАКОВ
*Ilya.babakov28@mail.ru*
Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Т.А. ВОЛКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АРГ

*Аннотация.* В статье рассматривается метод хроматографического анализа газов, растворённых в трансформаторном масле (АРГ), как основной инструмент раннего выявления дефектов силовых маслонаполненных трансформаторов. Приведены классификации типичных неисправностей, обнаруживаемых по результатам АРГ.

*Ключевые слова:* силовой трансформатор, хроматографический анализ, растворённые газы, АРГ, диагностика дефектов, частичные разряды, перегрев масла, газовый маркер.

Анализ содержания газов, растворенных в трансформаторном масле, выполняется методом хроматографии согласно нормативному документу РД 34.46.303-98 («Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов»). Данная методика позволяет количественно определять следующие растворенные в масле компоненты: водород ($H_2$), метан ($CH_4$), ацетилен ($C_2H_2$), этилен ($C_2H_4$), этан ($C_2H_6$), оксид углерода (CO) и диоксид углерода ($CO_2$).

Установлены нормативные значения пределов обнаружения ($M_{ai}$) для каждого газа:

- для водорода – не более 0,0005 об. %;
- для метана, этилена и этана – не выше 0,0001 об. %;
- для ацетилена – до 0,00005 об. %;
- для оксида и диоксида углерода – максимум 0,002 об. %.

Кроме того, используемое аналитическое оборудование и применяемые хроматографические методики обязаны гарантировать погрешность измерений указанных газов в масле, значение которой находится в пределах, представленных в таблице 1.

Критерием повышенного содержания газов в трансформаторном масле является превышение их порога обнаружения в три и более раза.

С помощью хроматографического анализа растворённых в масле газов (АРГ) в трансформаторном оборудовании можно выявить две категории дефектов.

*Таблица 1*

Рекомендуемая погрешность измерения газов в масле

| Область измеряемых концентраций, %об | Суммарная погрешность измерения, %отн |
|---|---|
| <0.001 | >50 |
| 0.001-0.005 | <50 |
| 0.005-0.05 | <20 |
| >0.05 | <10 |

Первая категория – перегревные явления. Они затрагивают токоведущие соединения и металлические элементы магнитной системы. Характер образующихся газов зависит от температуры нагрева:

– при нагреве масла и пропитанной бумажной изоляции свыше 600 °C доминирующим компонентом выступает этилен ($C_2H_4$);

– если перегрев масла вызван дуговым разрядом, в максимальных концентрациях фиксируется ацетилен ($C_2H_2$).

В обоих температурных режимах сопутствующими газами (присутствуют всегда) являются водород ($H_2$), метан ($CH_4$) и этан ($C_2H_6$).

Вторая категория – электрические разряды внутри масла. Разряды подразделяются по энергии:

– частичные разряды. Основной газ – водород ($H_2$). В меньших количествах обнаруживаются метан ($CH_4$) и ацетилен ($C_2H_2$);

– искровые и дуговые разряды. Ключевыми газами выступают водород ($H_2$) либо ацетилен ($C_2H_2$). При этом метан и этилен ($C_2H_4$) могут присутствовать в любых долях (но всегда фиксируются.

Дополнительные диагностические признаки:

– превышение пороговых уровней оксида углерода (CO) и диоксида углерода ($CO_2$) может указывать на ускоренное старение или увлажнение твёрдой изоляции;

– при перегревах самой твёрдой изоляции (бумаги, картона, древесины) ведущим газом становится диоксид углерода ($CO_2$).

В таблице 2 приведены примеры типичных дефектов в силовых трансформаторах.

*Таблица 2*

Типичные дефекты в силовых трансформаторах

| Состав газов | Вид дефекта | Причины появления газов |
|---|---|---|
| $C_2H_2$ или $H_2$ - основные газы; $CH_4$, $C_2H_4$, CO - характерные газы с высоким содержанием | Разряды высокой энергии, дуга | Замыкания: - обмотки НН на землю; - между обмотками; - высоковольтными вводами и баком; - отводом и баком; - обмотками и остовом трансформатора; - межвитковые |
| $C_2H_6$ - основной газ; $CH_4$ , CO - характерные газы с высоким содержанием | Термический дефект, $T < 300$ °C | Перегрузка трансформатора. Нарушение потока масла в охлаждающих каналах обмоток и магнитной системы. Недостаточная эффективность системы охлаждения, вызванная: - загрязнением наружной поверхности радиаторов; - нарушением потока масла внутри радиаторов; - снижением эффективности работы вентиляторов, маслонасосов; - недостаточной эффективностью работы системы охлаждения, допущенной при проектировании/производстве. Нагрев металлических элементов конструкции потерями от полей рассеяния в начальной стадии развития дефекта. |
| $CH_4$ - основной газ; $C_2H_4$, $C_2H_6$ - характерные газы | Термический дефект, 300 °C$\leq T \leq$700 °C | Нарушение контактных соединений, в том числе неудовлетворительное состояние контактных соединений РПН, ПБВ. Токи, циркулирующие по: - ярмовым прессующим балкам и стяжным шпилькам при нарушении изоляции стяжных шпилек; - прессующим элементам и пластинам электротехнической стали; - заземляющим проводам. Нарушение изоляции между соседними параллельными проводниками в обмотке. Нагрев средней интенсивности металлических элементов конструкции потерями от полей рассеяния |
| $C_2H_4$ - основной газ; $C_2H_2$ , $CH_4$ - характерные газы с высоким содержанием | Термический дефект, $T > 700$ °C | Нарушение контактных соединений. Нарушение изоляции пластин магнитной системы с образованием короткозамкнутых контуров. Перегрев металлических элементов конструкции потерями от полей рассеяния. |
| $H_2$ - основной газ; $CH_4$ - характерный газ | ЧР | Разряды в заполненных газом полостях, возникающие из-за: - неполной пропитки изоляции; - высокой влажности целлюлозной изоляции; - перенасыщения масла газом, в том числе в результате кавитации. |
| $H_2$ или $C_2H_2$ - основные газы; $CH_4$ – характерный газ с низким содержанием | Разряды низкой энергии | Искрение или дуговые разряды в плохих контактных соединениях элементов конструкции с различным или плавающим потенциалом в местах: - крепления электростатического экрана; - смыкания параллельных и элементарных проводников обмотки; - нарушений паяных соединений токоведущих цепей; - прохождения цепей заземления; - расположения пластин магнитной системы с нарушенной изоляцией при циркуляции вихревых токов. Разряды между конструктивными элементами остова трансформатора, отводами обмотки ВН и баком, обмоткой ВН и заземлением. Разряды в масле при переключениях контактов. |
| $CO_2$ - основной газ; CO – характерный газ | Деструкция целлюлозной изоляции | Перегрузка трансформатора. Высокая влажность масла. Снижение эффективности системы охлаждения. |

Расшифровка результатов хроматографического анализа газов, растворённых в трансформаторном масле, для выявления основного и характерного компонентов выполняется в несколько этапов.

Этап 1. Расчёт относительных концентраций газов.

Для каждого газа вычисляется его относительная концентрация $a_i$ по следующей формуле:

$$a_i = \frac{A_i}{A_{\text{гр}}},$$

где $A_i$ — измеренное содержание $i$-го газа в пробе масла;

$A_{\text{гр}}$ — суммарная концентрация всех газов анализируемой группы.

Этап 2. Определение основного газа

На основе полученных значений $a_i$ находится максимальная величина $a_{maxi}$. Газ, соответствующий этому максимуму, признаётся основным. Исключение составляет диоксид углерода ($CO_2$): он считается основным только в том случае, если его относительная концентрация превышает 1.

Этап 3. Классификация остальных газов по содержанию

– $a_i > 1$ – газ относится к категории характерных с высоким уровнем содержания;

– $0{,}1 < a_i < 1$ – газ считается характерным, но с низким содержанием;

– $a_i < 1$ – данный газ признаётся нехарактерным для выявленного дефекта.

Обязательное требование к начальным замерам.

Перед тем как вводить в эксплуатацию новый трансформатор либо оборудование, прошедшее ремонт, необходимо зафиксировать исходные концентрации всех растворённых газов – $A_{oi}$. Все последующие результаты анализов должны оцениваться не изолированно, а путём сравнения с этими первоначальными значениями.

Скорость выделения газов в масе силового трансформатора определяется его конструктивными параметрами: номинальным напряжением, установленной мощностью, типом охлаждающей системы. Именно эти характеристики задают напряжённость электрического поля, уровень магнитной индукции, допустимые плотности тока и условия отвода тепла.

В свою очередь, реальное содержание газов в масле трансформаторов, уже находящихся в эксплуатации, формируется под действием более широкого круга факторов. К ним относятся: способ защиты масла от окисления, используемая марка диэлектрической жидкости, продолжительность службы трансформатора, особенности его рабочих режимов, а также ряд других эксплуатационных параметров. Кроме того, на итоги хроматографического анализа (АРГ) существенно влияют корректность отбора проб, условия их транспортировки и сама процедура лабораторного измерения.

В таблице 3 приведены рекомендуемые значения диагностических (ДЗ) и предельно допустимых (ПДЗ) концентраций для трансформатора класса 110 кВ

с плёночной защитой масла. Указанные пороговые уровни систематизированы по пяти ключевым признакам, определяющим их величину:

1. Класс напряжения.
2. Тип защиты масла.
3. Срок службы трансформатора.
4. Установленная мощность.
5. Марка трансформаторного масла.

Численные значения ДЗ и ПДЗ, представленные в таблице 3, получены на основе интегральной функции распределения фактических концентраций газов, зафиксированных у заведомо исправных (работоспособных) трансформаторов. При этом диагностический уровень (ДЗ) установлен для 0,92, а предельно допустимый уровень (ПДЗ) – для 0,98.

Превышение диагностического уровня (ДЗ) следует трактовать как пороговое значение, за которым темп газообразования становится аномально высоким, что позволяет выявить зарождающийся дефект оборудования. Однако такое заключение справедливо только при условии, что предварительно исключено влияние нормальных эксплуатационных факторов на рост концентраций газов.

*Таблица 3*

Рекомендуемые ДЗ и ПДЗ концентрации растворённых газов в масле силового трансформатора 110 кВ с пленочной защитой

| Уровень | Срок эксплу-атации, лет | Концентрации газов, % об. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | СРГ | $H_2$ | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_2H_4$ | $C_2H_2$ | Срок эксплу-атации, лет | CO | $CO_2$ |
| Трансформаторы 110 кВ с пленочной защитой | | | | | | | | | | |
| ДЗ | 0-5 | 0,012 | 0,006 | 0,003 | 0,0013 | 0,005 | 0,0003 | весь | 0,045 | 0,30 |
| | >5 | 0,013 | 0,005 | 0,004 | | | | | | |
| ПДЗ | 0-5 | 0,025 | 0,010 | 0,025 | 0,0040 | 0,010 | 0,0008 | весь | 0,070 | 0,50 |
| | >5 | 0,035 | 0,025 | 0,009 | | | | | | |

Если объём накопленных статистических данных оказывается недостаточным для вычисления диагностических (ДЗ) и предельно допустимых (ПДЗ) уровней газосодержания в трансформаторном масле методом интегральной функции распределения, допускается обращение к нормативам, представленным в таблицах 3 и 4.

В этих таблицах приведены значения концентраций газов, которые фиксируются после завершения заводских испытаний оборудования. В ходе приёмо-сдаточных испытаний трансформатора на предприятии-изготовителе в масле неизбежно образуется определённое количество газов. Результаты

статистической обработки данных хроматографического анализа (АРГ), полученных на трансформаторах после таких испытаний, позволили рассчитать диагностические уровни (ДЗ) концентраций газов. Эти расчётные значения также включены в таблицу 4.

*Таблица 4*

Рекомендуемые ДЗ концентрации растворённых газов в масле трансформаторов 110 кВ при вводе в эксплуатацию и после приемо-сдаточных испытаний на заводе

| Класс напряжения | Дз концентрации газов, % об. | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $H_2$ | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_2H_4$ | $C_2H_2$ | CO | $CO_2$ |
| 110 | 0,001 | ** | ** | ** | ** | 0,009 | 0,070 |

** - уровень концентраций на границе предела обнаружения.

На предприятии-изготовителе отбор масла из бака трансформатора для анализа растворенных газов рекомендуется выполнять спустя 4–6 часов после завершения всех испытательных процедур. Если по итогам анализа хотя бы по одному из газов зафиксировано значение, превышающее норматив, указанный в таблице 4, следует провести повторный отбор пробы. В случае, когда повторный анализ подтверждает выход концентраций за пределы диагностического уровня (ДЗ), необходимо выявить источник аномального газообразования и устранить его. Важно учитывать, что повышенные концентрации газов могут быть связаны с особенностями конструкции трансформатора, нюансами производственной технологии или свойствами материалов, применённых при изготовлении. Поэтому значения ДЗ, представленные в таблице 4, носят справочный характер.

Перед первым включением нового трансформатора либо оборудования, прошедшего ремонт, в обязательном порядке определяются исходные концентрации растворённых газов – $A_{oi}$.

Если полученные значения $A_{oi}$ оказываются выше диагностических уровней из таблицы 4, рекомендуется провести вакуумную обработку масла (дегазацию). В тех случаях, когда дегазация невозможна по техническим причинам, фактические концентрации, измеренные перед пуском, принимаются в качестве исходных (базовых) для последующего мониторинга.

Анализ растворенных газов (АРГ) является наиболее эффективным методом диагностирования дефектов силовых трансформаторов, поскольку он позволяет выявлять развивающиеся дефекты (перегрев, дуги, частичные разряды) на самой ранней стадии без вывода оборудования из эксплуатации, что выгодно отличает его от электрических методов, тепловизионного контроля и физико-химического анализа масла. В отличие от большинства альтернативных способов, АРГ дает количественную оценку концентраций ключевых газов-маркеров (водорода, ацетилена, этилена, оксида углерода), что позволяет точно идентифицировать тип, интенсивность и даже локализацию

внутреннего дефекта (например, отличая перегрев масла от деградации целлюлозной изоляции). Кроме того, этот метод пригоден для непрерывного онлайн-мониторинга, обладает высокой чувствительностью к ранним стадиям деградации, что делает его незаменимым инструментом предиктивной диагностики и управления активами в электроэнергетике.

**Библиографический список**

1. «ПАО» Россети - методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле: 17.04.2019. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/429/2u5aztzcuh11j3pcuox4mmgo135erwpq.pdf

2. Рд 153-34.0-46.302-00 - методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: 01.01.2001. [электронный ресурс]. – URL: https://kb.has.ru/_media/soft:rd_153-34.0-46.302-00.pdf

3. И.В. Давиденко - оценка технического состояния силовых трансформаторов по результатам традиционных испытаний и измерений: Екатеринбург, Урфу, 2015. [Электронный ресурс]. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/36214/1/978-5-321-02466-9_2015.pdf

4. Инженерная школа энергетики - Совершенствование технологии импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов: Томск, ТПУ, 2022. [Электронный ресурс]. – URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/71399/1/TPU1362048.pdf

© Бабаков И.В., 2026

УДК 621.311

А.К. АНДРЕЕВ
*uust-andreevak@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент М.Б. ГАРЕЕВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ STATCOM

*Аннотация*. В данной работе рассматривается задача компенсации реактивной мощности в электрической сети с целью повышения качества электроэнергии. Разработана математическая модель электрической сети с

использованием статического компенсатора реактивной мощности (STATCOM). Модель реализована в среде MATLAB с применением пакета Simulink. Проведен анализ режимов работы сети до и после компенсации. Полученные результаты демонстрируют повышение уровня напряжения и снижение реактивной мощности.

*Ключевые слова*: реактивная мощность, STATCOM, математическая модель, электрическая сеть, компенсация, MATLAB, Simulink.

**Введение**

В современных электрических сетях одной из ключевых проблем является наличие реактивной мощности, которая приводит к увеличению потерь энергии, снижению уровня напряжения и ухудшению качества электроэнергии. Особенно остро данная проблема проявляется в сетях с удалёнными нагрузками и высокими индуктивными составляющими.

Для решения данной задачи применяются различные устройства компенсации, среди которых особое место занимает статический синхронный компенсатор (STATCOM). Использование таких устройств позволяет эффективно регулировать напряжение и уменьшать реактивную мощность.

Целью данной работы является разработка математической модели компенсации реактивной мощности и её реализация в среде MATLAB.

**Математическая модель системы**

Рассматриваемая электрическая сеть включает следующие элементы:

– источник напряжения;

– линия электропередачи;

– нагрузка;

– компенсирующее устройство STATCOM.

На рис. 1 представлена структурная схема модели.

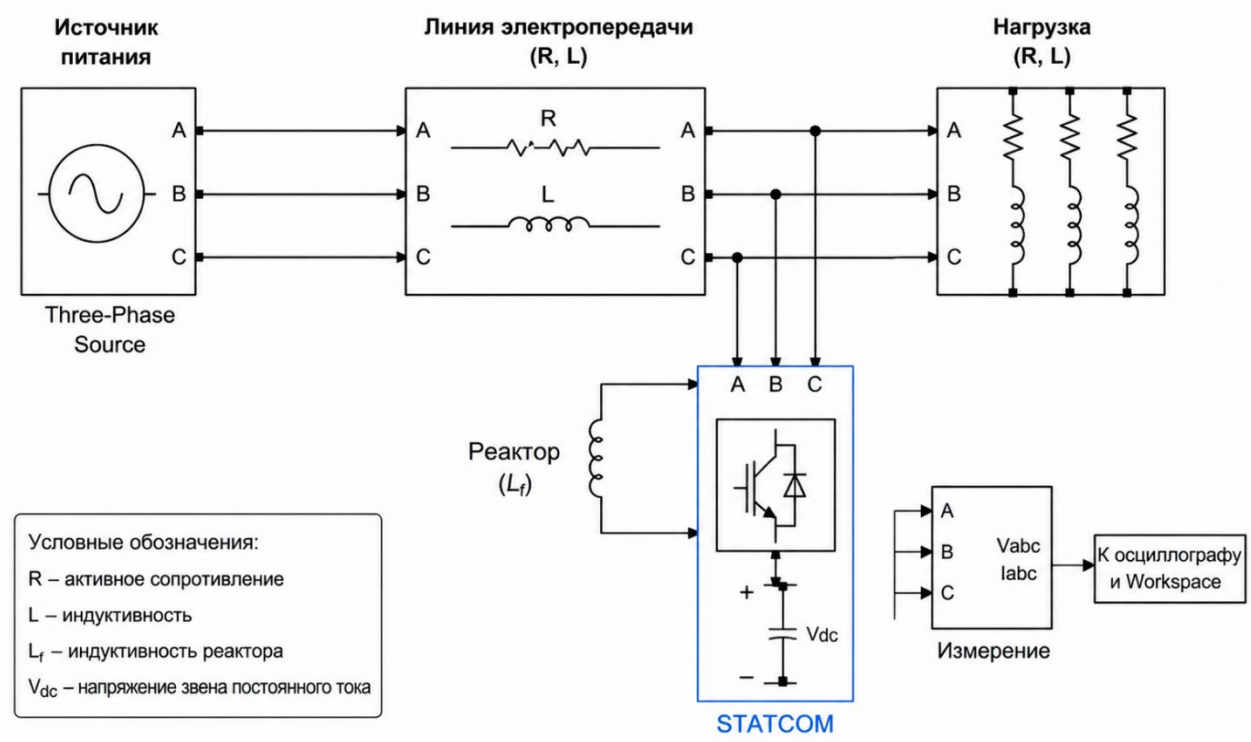



*Рис. 1.* Модель электрической сети в среде MATLAB/Simulink

Математическая модель строится на основе законов Кирхгофа и уравнений электрических цепей.

Для участка сети справедливо:

$$U = I \cdot Z$$

где $U$ — напряжение;

$I$ — ток;

$Z$ — полное сопротивление.

Реактивная мощность определяется выражением:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$$

STATCOM моделируется как управляемый источник напряжения, подключённый к сети через реактор. Ток компенсатора определяется разностью напряжений сети и источника.

**Реализация модели в MATLAB**

Модель реализована в среде MATLAB с использованием пакета Simulink.

В процессе моделирования были заданы параметры сети:

– напряжение источника;

– параметры линии ($R$, $L$);

– параметры нагрузки;

– параметры компенсатора.

На основе модели получены графики изменения напряжения и реактивной мощности во времени.

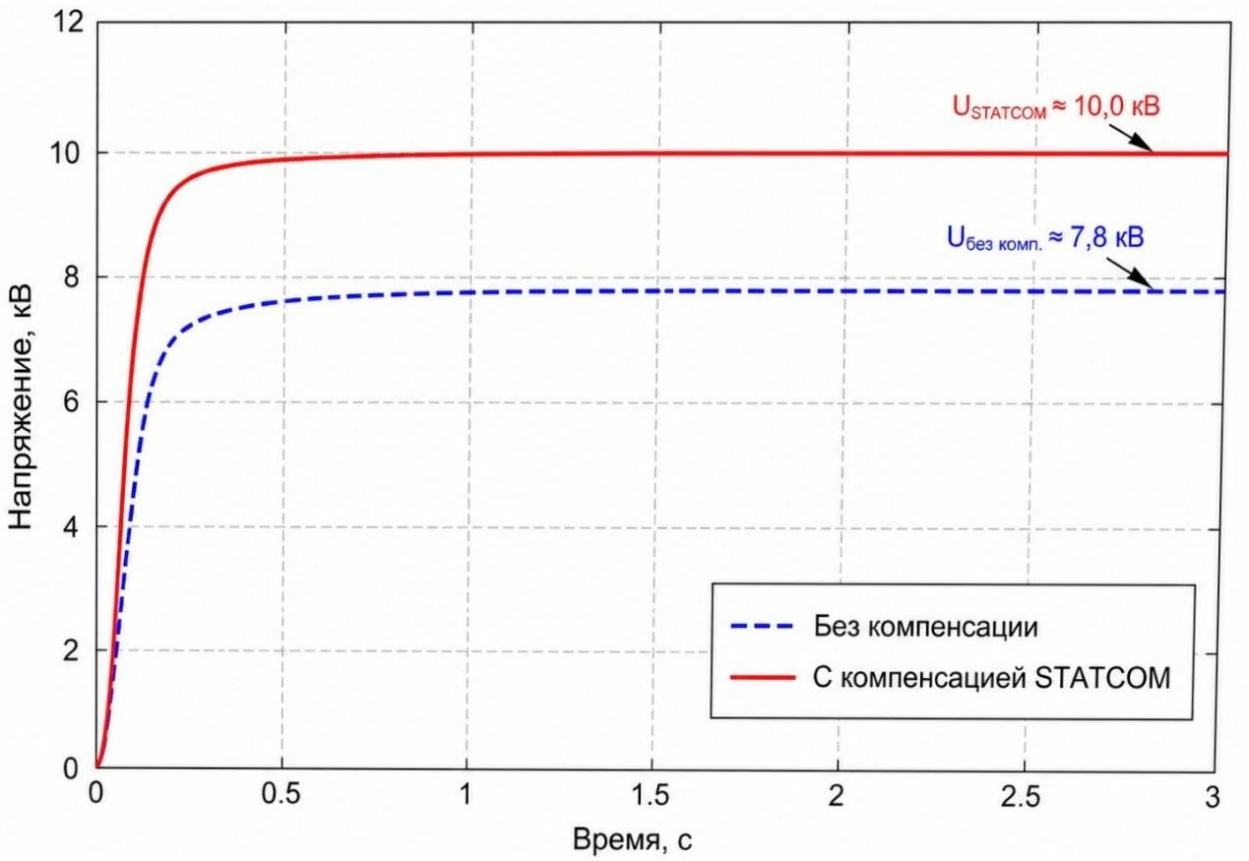



*Рис. 2.* Напряжение в узле нагрузки

Из графика, представленного на рис. 2, видно, что при подключении компенсатора уровень напряжения увеличивается и стабилизируется.

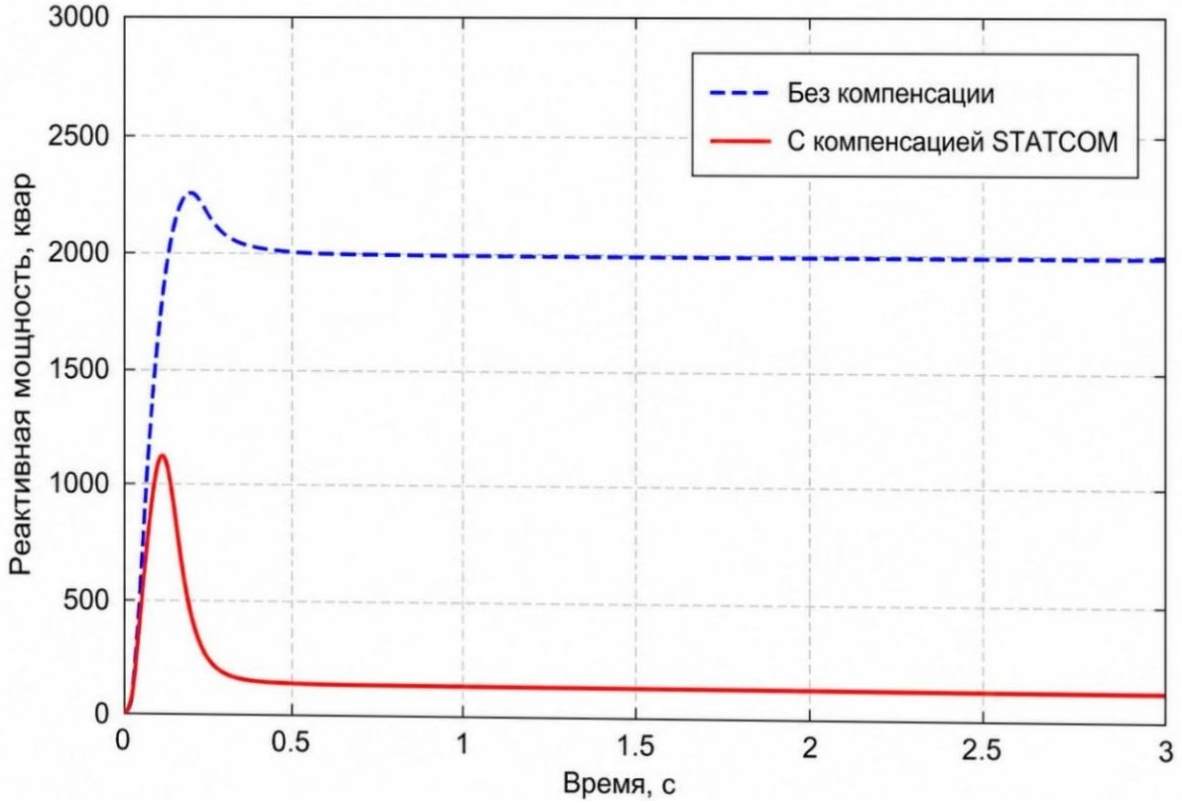



*Рис. 3.* Реактивная мощность

После подключения STATCOM наблюдается значительное снижение реактивной мощности, что подтверждает эффективность компенсации.

Результаты моделирования сведены в таблицу 1.

*Таблица 1*

| **Параметр** | **Без компенсации** | **С компенсацией STATCOM** |
|---|---|---|
| Напряжение, кВ | 7,8 | 10,0 |
| Реактивная мощность, квар | 2000 | 200 |
| Ток нагрузки, А | выше | ниже |
| Потери мощности | повышенные | сниженные |

Как видно из таблицы 1, применение STATCOM позволяет существенно повысить напряжение и снизить реактивную мощность.

**Анализ результатов**

Результаты моделирования показывают:

– увеличение напряжения в узле нагрузки;

– снижение реактивной мощности;

– улучшение режима работы сети.

**Преимущества и недостатки модели**

Преимущества:

– наглядность анализа процессов;

– возможность изменения параметров системы;

– простота реализации в MATLAB;

– возможность дальнейшего усложнения модели.

Недостатки:

– упрощённое представление реальной системы;

– отсутствие учёта всех нелинейных эффектов;

– зависимость точности от заданных параметров.

**Заключение**

В работе разработана математическая модель компенсации реактивной мощности в электрической сети. Реализация модели в MATLAB позволила наглядно продемонстрировать влияние STATCOM на режим работы сети.

Полученные результаты подтверждают эффективность использования компенсирующих устройств для повышения качества электроэнергии.

## Библиографический список

1. Hingorani, N. G., Gyugyi, L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York: IEEE Press, 2000. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/539733.

2. Zhang, X., Rehtanz, C., Pal, B. Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control. – Berlin: Springer, 2012. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-28274-1.
3. Kundur, P. Power System Stability and Control. – New York: McGraw-Hill, 1994. [Электронный ресурс]. URL: https://archive.org/details/powersystemstabi0000kund
4. MathWorks. Simulink Documentation. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/help/simulink/.
5. MathWorks. MATLAB Documentation. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/.

© Андреев А.К., 2026

УДК 621.31

А.Р. АХМЕТЯНОВ
*axmetyanov@2004bk.ru*
Науч. руковод. – ст. преподаватель Е.Ю. ШВАРЦМАН

***Уфимский университет науки и технологий***

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ТРАДИЦИОННЫХ К ЦИФРОВЫМ ПОДСТАНЦИЯМ

*Аннотация*. Статья посвящена актуальной теме модернизации энергетической инфраструктуры – комплексному сравнению цифровых и традиционных подстанций. В данной статье проведен анализ, на основе которого оценивается экономическая эффективность и эксплуатационная эффективность цифровых подстанций.

*Ключевые слова*: цифровые подстанции (ЦПС), традиционные подстанции (ПС), сравнительный анализ, цифровые технологии.

На ЦПС работа осуществляется по единому протоколу связи МЭК 61850, вся информация передается по единой информационной среде от оборудования ПС до диспетчерского пункта [1,23,24]. Цифровая подстанция, по определению, приведенному в ПАО «Россети» – «автоматизированная подстанция, оснащенная взаимодействующими в режиме единого времени цифровыми информационными и управляющими системами и функционирующая без присутствия постоянного дежурного персонала». В 2025 году во многих регионах России уже применяются ЦПС, управление которыми осуществляется дистанционно. Одни из недавних ЦПС, введенных в работу: ЦП «Мирная» в Краснокамском районе Башкирии – введена в 2025 году [2]; Компания «Роснефть» в 2023 году ввела в эксплуатацию мобильную подстанцию

мощностью 35 кВт на Ванкорском месторождении [3]. В 2023 состоялось открытие новой подстанции в республике Татарстан – «Азино 110 кВ» [4].

Цифровые подстанции характеризуются многоуровневой архитектурой, Основным элементом, координирующем все процессы на ЦП является протокол IEC 61850, он требует дополнительного оборудования по сетям, таким как GOOSE. Эта архитектура предусматривает разделение функциональных систем управления цифровой подстанцией на 3 уровня:

1) полевой уровень (уровень процесса);
2) уровень присоединения;
3) подстанционный уровень.

Уровень процесса – это технические средства цифрового интерфейса, подключенные к шине процесса. На данном уровне происходит оцифровка и передача на уровень присоединения информации о параметрах [5].

Уровень присоединения – имеет в основе интеллектуальные электронные устройства, выполняет функции автоматизированных систем технологического управления. Состоит из интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), выполняющих прикладные функции АСТУ, включая РЗА, для соответствующего основного оборудования [6, 25, 26].

Уровень подстанции включает в себя сервера верхнего уровня: сервер базы данных, сервер SCADA, сервер телемеханики, сервер сбора и передачи технологической информации, средства информационной интеграции цифровой ПС и ЦУС в соответствии с МЭК 61850-90-2 [6].

Цифровой обмен данными в цифровых подстанциях использует GOOSE-сообщения для замены медных кабельных связей, предназначенных для передачи дискретных сигналов между устройствами, SV-потоков (Sampled Values) для передачи оцифрованных значений токов и напряжений. Данные передаются по оптоволоконным линиям связи, это обеспечивает высокую скорость, надежность и помехоустойчивость.

Защита на традиционных подстанциях основана на традиционных электромеханических реле и аналоговых трансформаторах. Эти устройства имеют ограничены по скорости срабатывания и точности измерений. Микропроцессорные устройства имеют большую скорость обработки и передачи сигнала. Еще одним отличием традиционной ПС от ЦП является большое количество кабеля, который нужен для подключения аналоговых устройств и систем управления. Это усложняет и увеличивает время монтажа [7].

В зависимости от задач и необходимой глубины внедрения цифровых протоколов можно выделить три архитектуры на основе стандарта МЭК 61850:

Для первого типа архитектуры характерен дискретный и аналоговый тип обмена сигналов между устройствами. Обмен информации с вышестоящим уровнем обеспечивается через протокол МЭК 61850-8-1 MMS.

Вторая архитектура: взаимодействие между устройствами выполняется GOOSE-сообщениями; информационный обмен с верхним уровнем

осуществляется по протоколу МЭК 61850-8-1 MMS; значения тока и напряжения передаются по электрическим цепям.

Третья архитектура отличается от второй тем, что информация от измерительных устройств передается в виде цифрового сигнала через протокол передачи мгновенных значений (SV-потоков. [8, 22].

Исходя из информации, размещенной на сайте ПАО «РОССЕТИ», можно отметить, что вложения в цифровую модернизацию дают значительный прирост в надежности и эксплуатационных качествах ПС. Например, недавняя модернизация на подстанции 500 кВ «Иртыш», включавшая замену выработавшие ресурс микроэлектронные устройства РЗА на современные микропроцессорные комплексы, позволила повысить надежность электроснабжения потребителей в Тюменской области [10].

Работы по модернизации ПС 220 кВ «Селендума» в Селенгинском районе Бурятии, включавшие внедрение цифровой системы сбора и передачи информации, повысило качество управления объектом, от которого зависит надежность электроснабжения южных районов республики, а также межгосударственный транзит электроэнергии в Монголию [11].

Введение АНК «Башнефть» подстанции 110 кВ «Мирная» в Краснокамском районе Республики Башкортостан позволило обеспечить надежное электроснабжение более 470 добывающих скважин и 5 крупных производственных площадок: нефтепарка [12].

В исследовании [15] приводятся данные о внедрении ЦПС на территории Западной Европе, осуществляемой компанией ABB. На данной ПС классическая структура была заменена на цифровую, дополнительно были применено облачное приложение для глубокой аналитики с применением математических моделей и методов искусственного интеллекта. На подстанции, состоящей из 20 распределительных ячеек среднего напряжения, сроки отключений сократились с 2 ч за 5 лет эксплуатации до 0,2 ч за 10 лет, что привело к экономии более $7000 в год. Траты на обслуживание сократились с $8000 в год до $4000 при предиктивном обслуживании. Затраты на модернизацию (датчики, контроллеры, монтаж, пусконаладка) составили $16000 плюс $1600 за систему аналитики. Все приведенные затраты окупились за 1,6 года.

Применение стандартов МЭК 61850 внесло массу положительных изменений в технологию управления ЦПС, но при этом появилась проблема в виде киберугроз, которые могут привести к нарушениям в системе безопасности ПС. При неправильно настроенных сетевых защитах через несанкционированный удаленный доступ к подстанциям или некорректные действия и скрытые отказы в устройствах защиты могут привести к отключениям линии. Кибератаки на подстанции могут вызвать срабатывание нескольких коммутационных аппаратов и каскадные последствия с серьезным воздействием на энергосистему. [13, 19].

Техническое обслуживание подстанций старого образца требует регулярных плановых проверок, регламентных работ. ЦП же обладают

встроенными средствами диагностики, которые позволяют сократить количество физических инспекций. Это обеспечивает снижение периодичности обслуживания по сравнению с аналоговыми системами.

Стоимость технического обслуживания цифровых подстанций ниже благодаря дистанционному мониторингу и аналитике. Эксплуатация цифровых подстанций также предъявляет повышенные требования к квалификации персонала. Специалисты должны обладать навыками работы с новым программным обеспечением и интерфейсами обладать навыками по применению новых инструментов конфигурирования и диагностики ПС.

Организации необходимо выделять дополнительные расходы на переподготовку существующего персонала и привлечение высококвалифицированных специалистов. Однако автоматизация рутинных операций позволяет сократить общую численность обслуживающего персонала [14].

Внедрение технологий цифровой подстанции обеспечивает ряд существенных преимуществ. Сокращение объёма медных контрольных кабелей на 70–80% снижает материалоёмкость проекта, уменьшает трудозатраты на монтаж и позволяет использовать более компактные кабельные сооружения. Оптоволоконные линии связи обладают высокой помехоустойчивостью и невосприимчивы к электромагнитным воздействиям, характерным для подстанций высокого напряжения. Цифровые измерительные трансформаторы обеспечивают более высокую точность измерений в широком динамическом диапазоне, не подвержены эффекту насыщения магнитопровода при больших токах короткого замыкания.

Для повышения срока эксплуатации и улучшения контроля за состоянием ЦПС возможна интеграция различных инновационных технологий. К таким технологиям можно отнести, например, технологию дистанционного визуального контроля агрегатов ПС, описанную в статье [20]. Данная разработка подразумевает, что с использованием микроконтроллерного программного обеспечения создается комплекс, состоящий из камеры, оборудования, необходимого для передачи данных, сервера обработки и программного обеспечения. Данная система будет намного надежнее при использовании инфракрасных камер и тепловизоров для контроля не только за положением коммутационной аппаратуры, но и за температурным режимом работы данной аппаратуры [20].

Повышению устойчивости ЦПС также может поспособствовать внедрение нейронных сетей, которые облегчат и ускорят выполнение многих задач. Например, применение нейросетей в Китае в провинции Юньнань позволило значительно облегчить контроль оборудования на ПС, инспекция с использованием искусственного интеллекта, проводимая при помощи камер, дронов позволило выполнить задачи в разы быстрее [18].

Комплексы систем ИИ могут использоваться как в сегменте генерации электрической энергии, так и в сегменте передачи и распределения электрической энергии. Использование ИИ и машинное обучение способны

рассчитывать износ и предсказывать возможные аварии. В электроэнергетике уже используют оборудование на основе искусственного интеллекта. Система собирает большие массивы данных, собранных датчиками и прогнозирует события [21].

Исходя из проведенного анализа примеров внедрения ЦПС на территории России за последние годы, а также анализа научных статей [6, 14, 15], можно определить примерные данные по основным факторам расходов при проектировании и эксплуатации ЦПС:

Стоимость основного оборудования может быть снижена на 30%. Это может быть достигнуто уменьшением стоимости внедрения оборудования на смежных подстанциях за счёт использования общего оборудования, а также уменьшением размеров здания общеподстанционных пунктов управления (ОПУ), так как сокращается количество медных кабелей, панелей и т.д.

Сокращение сроков проектирования – до 25% можно осуществить с помощью стандартизированных физических интерфейсов, упрощённой прошивки и настройки, стандартизированного документирования соединений с первичным оборудованием.

Сокращение объёмов монтажных и пусконаладочных работ до 45% можно достичь за счет установки объединенного устройства управления подстанцией, совмещающего функции управления и релейной защиты.

Основные проблемы при внедрении ЦПС могут возникать из-за наличия пробелов в нормативно-технической документации, отсутствия промышленных образцов цифровых ТТ и ТН, пригодных к широкому внедрению на объектах ПС, отсутствия единого подхода субъектов энергетики к цифровизации, необходимости разработки ПО для проектирования ЦПС, необходимости повышения квалификации наладочных, эксплуатирующих и проектных организации.

По проведенному анализу, составим сравнительные таблицы 1 и 2, в которых отражена экономическая выгода, которую можно добиться при проектировании и эксплуатации цифровых подстанций.

*Таблица 1*

| Категория затрат | Традиционные подстанции | Цифровые подстанции (по МЭК 61850) |
|---|---|---|
| 1. Проектные и работы | Стандартные, в связи с более низкой сложностью. | Затраты выше (на 20-40%). Требуются специалисты по МЭК 61850, цифровым релейным защитам, системной инженерии. |
| 2.Первичное оборудование (силовые трансформаторы, выключатели, разъединители) | Одинаковая стоимость - определяется классом напряжения и мощностью. | Одинаковая стоимость (Возможна некоторая оптимизация за счет уменьшения размеров ОРУ при полной цифровизации). |
| 3.Вторичное оборудование | Относительно низкая стоимость. Отдельные | Стоимость выше (на 15-30%). Интеллектуальные электронные |

| | | |
|---|---|---|
| (Система РЗА и управления) | устройства (реле, приборы) с аналоговыми входами. Простые медные цепи. | устройства (ИЭУ), микропроцессорные терминалы с цифровыми входами. Оптическая проводная среда (LAN, оптические кабели). |
| 4.Кабельная инфраструктура | Высокая стоимость. Тяжелые медные кабели цепей ТТ, ТН, управления. | Кардинально ниже (на 50-70%). Замена аналоговых сигнальных кабелей на оптоволоконные. Резкое сокращение объема меди и работ. |
| 5. Пуско-наладочные работы (ПНР) | Более длительные и трудоемкие. | Выше сложность, но ниже трудоемкость физического монтажа. Основные усилия - на тестирование систем (подтверждение GOOSE-сообщений, синхронизации). |

*Таблица 2*

| Параметр / Статья затрат | Традиционная подстанция | Цифровая подстанция (по МЭК 61850) |
|---|---|---|
| 1. Техническое обслуживание и ремонты | Высокая стоимость. Большой объем плановых ревизий, проверок цепей, чистка контактов. | Стоимость ниже (на 30-50%). Использование дистанционного мониторинга состояния и централизованной диагностики. |
| 2. Затраты на персонал | Требуется большее количество персонала широкого профиля для физического обслуживания. | Требуется меньше персонала, но более высокие требования к квалификации (IT-специалисты, инженеры-кибернетики); возможность удаленного управления. |
| 3. Модернизация и расширение | Более сложная и дорогая. Необходима прокладка новых кабелей, изменение многих схем, длительные остановки. | Более простая и занимает меньше времени. Добавление нового устройства — это в первую очередь изменение конфигурации в ПО и подключение к общей цифровой шине. |
| 4. Потери от ложных срабатываний и аварий | Стоимость выше. Сложность диагностики, человеческий фактор при обслуживании обширных цепей. | Стоимость ниже. Встроенные системы самодиагностики, контроль целостности цифровых цепей, возможность быстрого анализа осциллограмм и событий. |
| 5. Кибербезопасность | Минимальные затраты (физическая защита). | Необходимы: межсетевые экраны, системы обнаружения вторжений (IDS), регулярное обновление ПО, аудит. |

Для корректного сравнения двух типов подстанций используется показатель совокупной стоимости владения *TCO* (Total Cost of Ownership):

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^{T} \frac{OPEX_t + C_{аварий,t}}{(1+r)^t} \quad (1)$$

где *CAPEX* – капитальные затраты на строительство/модернизацию, руб;

$OPEX_t$ – операционные расходы в году $t$ (обслуживание, персонал, энергопотребление собственных нужд), руб;

$C_{аварий,\ t}$ – стоимость последствий аварий и незапланированных простоев в году $t$, руб;

$r$ – ставка дисконтирования (норма доходности), доли;

$T$ – расчётный срок жизненного цикла, лет (обычно 25–30 лет).

Практика показывает, что при $T$ = 25 лет и $r$ = 10% значение ТСО цифровой подстанции оказывается на 15–25% ниже, чем у традиционной, несмотря на более высокий CAPEX – именно за счёт снижения OPEX и аварийных издержек.

Проведенный технический анализ выявил значительные различия в архитектуре традиционных и цифровых подстанций. Цифровые решения обеспечивают хорошие параметры автоматизации процессов и интеграцию современных систем мониторинга, что предоставляет возможность эффективнее управлять потоками энергии. Это создает основу для повышения общей надежности и адаптивности энергосистемы к изменяющимся условиям.

Экономическая оценка показала, что цифровые подстанции требуют более высоких первоначальных инвестиций по сравнению, однако в долгосрочной перспективе они обеспечивают значительную экономию за счет снижения эксплуатационных расходов и уменьшения потерь энергии.

Эксплуатационные преимущества цифровых подстанций проявляются в их повышенной надежности и сокращении времени восстановления после аварий. Автоматизация процессов снижает зависимость от человеческого фактора, что минимизирует риски ошибок и повышает безопасность.

## Библиографический список

1. Могильницкая А.А. Цифровые подстанции (Digital Substations)// Актуальные проблемы энергетики: Минск: БНТУ, 2025– URL:https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/108974/101104.pdf?sequence=1

2. Запуск первой цифровой электроподстанции в республике [Электронный ресурс] // Комсомольская правда. - 2025. - 15 янв. - URL:https://www.ufa.kp.ru/daily/27702/5090626/

3. «Роснефть» запустила первую в России высокоавтоматизированную мобильную подстанцию/ [Электронный ресурс] // Роснефть. - 2023. – URL: https://www.rosneft.ru/press/news/item/215755/.

4. В Казани в районе Азино начала работу цифровая подстанция нового поколения [Электронный ресурс] // KER Group. – 2023. – 12 мая. - URL:http://ker-holding.com/press-center/news/v-kazani-v-rayone-azino-nachala-rabotu-tsifrovaya-podstantsiya-novogo-pokoleniya-/.

5. Дубров С.С. Цифровая подстанция как средство повышения надежности электроснабжения // Молодежь и инновации: сб. материалов XX Междунар. науч.-практ. конф. – Минск: БГТУ, 2023. – С. 215-217. – URL: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/42875/1/Дубров_Цифровая.pdf

6. Тимофеев А.С., Макарцов М.Д. Цифровые подстанции (ЦПС) класса напряжения 35-110 кВ. Иркутский национальный исследовательский техническийуниверситет(Россия,г.Иркутск)-URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-podstantsii-tsps-klassa-napryazheniya-35-110-kv/viewer

7. Бессольцев В. С., Хорьков С. А. Цифровая подстанция: структура, протоколы, архитектура // Электронная библиотека УдГУ.- URL:http://elibrary.udsu.ru/xmlui/handle/123456789/21374?show=full

8. Andrianova D.S., Pavlova E.G., Hakimyanov F.I., Hazieva G.R. Основы построения цифровых подстанций в рамках концепции «Цифровая трансформация 2030» // Science. – 2023. - Vol. 1. - P. 34-45. - URL:https://www.sciencen.org/assets/DOI/KOF-195-Andrianova-Pavlova-Hakimyanov-Hazieva.pdf

9. Merebashvili T.A. Основные направления цифровизации электроэнергетики [Электронный ресурс] / Ассоциация «Цифровая энергетика». - 2020. - URL: https://www.digital-energy.ru/wp-content/uploads/2020/12/merebashvili-t.a.pdf .

10. Филиал ПАО «Россети» внедрил современные цифровые защиты на ключевом энергообъекте Тюменской области [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». - 2024. - 11 нояб. – URL:https://www.rosseti.ru/press-center/news/filial-pao-rosseti-vnedril-sovremennye-tsifrovye-zashchity-na-klyuchevom-energoobekte-tyumenskoy-obl/?sphrase_id=169672

11. Филиал ПАО «Россети» внедрил цифровую информационную систему на ключевом центре питания юга Бурятии [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». - 2023. - 10 окт.

12. «Башнефть» запустила первую полностью автоматизированную цифровую подстанцию в Башкирии [Электронный ресурс] // Роснефть. - 2023. - 25 дек. - URL:https://www.rosneft.ru/press/news/item/222167/

13. Проблемы реализации, наладки и кибербезопасности цифровых подстанций [Электронный ресурс] // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. - 2024. № 1(61). – URL:https://vestnikskfu.elpub.ru/jour/article/view/2739/2622

14. Мышкина Л.С. Организационно-экономический инструментарий интеграции локальных интеллектуальных энергосистем в региональную энергетику: дис. … канд. экон. наук. – Екатеринбург: УрФУ, 2023. – 187 с. – URL:https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/142680/1/urfu2748.pdf

15. Кузьмин Е.В. Цифровая подстанция как элемент интеллектуальной энергосистемы: концепция и опыт внедрения в России // Научный Лидер. - 2025. – № 249. - С. 49-55. - URL:https://scilead.ru/public-journal/249

16. Преимущества цифровизации объектов энергетики [Электронный ресурс] // Control Engineering Россия. - 2023. - № 6. - С. 24-27. URL:https://controleng.ru/wp-content/uploads/9158.pdf

17. ПАО «Россети» СТО 34.01-21-005-2019

18. Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике // КиберЛенинка.

19. Rasheed, A., Kaur, D., Gjerde, O., & Petersen, S. An Approach for Analyzing Cyber Security Threats and Attacks:.URL:https://www.researchgate.net/publication/366000157_An_Approach_for_Analyzing_Cyber_Security_Threats_and_Attacks_A_Case_Study_of_Digital_Substations_in_Norway

20. Табаков О.В., Харитонова Т.В. Визуальный контроль коммутационных аппаратов на электрических подстанциях // Электротехнические системы и комплексы. - 2022. - № 3(56). - С. 45-52.

21. Левичев Д.Г., Пряхина Е.Н. Внедрение нейронной сети в кластерную цифровую подстанцию // 2024. – № 2. С. 112-120. - URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80328921

22. Горшков И.А. Интеллектуализация подстанции Благовещенск: выпускная квалификационная работа. – Благовещенск: АмГУ, 2023. - 89 с. - URL:

https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/VKR/3887.pdf

23. ГОСТ Р МЭК 61850-7-1-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Сети и системы связи на подстанциях;

24. IEC 61850. Модель данных оборудования подстанций и стандартизованные протоколы обмена

25. СТО 56947007-29.240.10.299-2020.Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС».

26. ГОСТ Р 70451-2022. Подстанции электрические. Автоматизированные системы управления технологическими процессами.

© Ахметянов А.Р., 2026

УДК 621.313

А.Е. БЫВАЛЬЦЕВ
*byvaltsev_2001@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ «ОПЕРАТОР БПЛА», ПРИМЕНЯЕМОЙ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ РАНЕНЫХ СВО

*Аннотация*. В рамках федерального проекта «Обучение служением» и проекта «Разработка средств реабилитации раненых СВО», реализуемого на кафедре электротехники и электротехнологий института электротехнического инжиниринга Уфимского университета науки и технологий разработана программа повышения квалификации «Оператор БПЛА».

*Ключевые слова*: программа повышения квалификации, беспилотный летательный аппарат, раненый, специальная военная операция, реабилитация, обучение служением.

Федеральный проект «Обучение служением» (ОС) объединяет обучение и социальную практику, где студенты решают реальные задачи, включая поддержку участников специальной военной операции (СВО). В рамках этой концепции создаются проекты по комплексной реабилитации (психологической, физической) и социальной адаптации раненых, зачастую в сотрудничестве с некоммерческими организациями (НКО) и госструктурами, что подтверждается проектами по созданию технических средств реабилитации. Проект «Разработка средств реабилитации раненых СВО», разработанный и реализованный преподавателями и студентами Уфимского университета науки и технологии в рамках программы «Обучение служением» (ОС), имеет два направления. Первое – это развитие социально-личностных компетенций технического специалиста и повышение его вовлеченности в социально значимые проекты [1,2] реабилитации раненых. В [3] отмечено, что волонтерская деятельность (ВД) студентов это важная форма социальной активности, способствующая формированию гражданской ответственности и личностному росту. В статье анализируются мотивы участия студентов в добровольчестве: социальные, гражданские, карьерные и личные. Анкетирование и интервью выявили положительное влияние ВД на развитие лидерских качеств, навыков командной работы и уверенности в себе. Подчеркнута необходимость поддержки ВД вузами, государством и обществом, предложены меры по повышению вовлеченности студентов в добровольческие инициативы. Второе направление проекта – это социальная адаптация участников боевых действий к гражданской жизни.

Одним из перспективных направлений является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в гражданской сфере: сельское хозяйство (мониторинг, опрыскивание); строительство (3*D*-моделирование, контроль); инспекция инфраструктуры (ЛЭП, трубопроводы); доставка грузов и поисково-спасательные операции и т.д.

Авторами разработана программа повышения квалификации (ППК) «Оператор БПЛА», объем программы 72 часа, по окончании обучения выдается удостоверение государственного образца, предназначенная для специалистов, имеющих высшее или среднее специальное образование. 36 часов ППК практические занятия (симуляторы, гоночные трассы дронов в программе *FPV Freerider* и др.).

На рис. 1. показано проведение практических занятий на программно-аппаратном симуляторе – кабина «Боинг».



*Рис. 1.* Проведение практических занятий на программно-аппаратном симуляторе – кабина «Боинг»

Авторами выбран прототип разработки бесколлекторный двигатель постоянного тока *Constar BO*6452*N*3*B* 03-95-24.0, 763 Вт, коммутация без датчиков Холла, номинальное напряжение 24 В, скорость холостого хода 9500 об/мин, ток холостого хода 2,6 А, номинальная скорость 7400 об/мин, максимальный КПД 90,9%, число фаз 3, масса 625 г.

Учебный план ППК «Оператор БПЛА» приведен в таблице 1.

ППК отличается от известных аналогов тем, что в ней рассматриваются вопросы управления БПЛА с учетом влияния магнитных аномалий [4].

*Таблица 1*

Учебный план ППК «Оператор БПЛА»

| № п/п | Наименование тем | Всего ак. часов | Очные лекционные занятия | Очные практические занятия | СРС |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Устройство и принцип действия электрических двигателей, применяемых в БПЛА, в том числе бесколлекторных двигателей переменного тока | 14 | 4 | 6 | 4 |
| 2 | Устройство и принцип действия БПЛА | 18 | 4 | 10 | 4 |
| 3 | Программное обеспечение, применяемое в БПЛА | 16 | 4 | 8 | 4 |
| 4 | Основные принципы управления БПЛА самолетного типа, в том числе с учетом влияния магнитных аномалий на полет БПЛА | 22 | 6 | 12 | 4 |
| | ВСЕГО | 70 | 18 | 36 | 16 |
| | Итоговая аттестация (тестирование) | 2 | | | |
| | ИТОГО | 72 | | | |

## Библиографический список

1. Пашали Д.Ю. Гареева М.Б., Гареев Р.И., Бабикова Н.Л. Исследование программы «Обучение служением» на развитие социально-личностных компетенций технического специалиста // Современные проблемы науки и образования № 6. 2025. [Электронный ресурс] URL: https://s.science-education.ru/pdf/2025/6/34345.pdf (дата обращения 7.04.2026).

2. Пашали Д.Ю. Гареева М.Б., Гареев Р.И., Бабикова Н.Л. Анализ результатов внедрения проекта «Курирование обучающихся с нарушениями опорно-двигательного аппарата» // Современные проблемы науки и образования №1 2026 [Электронный ресурс] URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=34421 (дата обращения 7.04.2026).

3. Кадирова Н.Е. Волонтерская деятельность как форма социальной активности студента // Когнитивные науки в информационном обществе. 2025. Т. 5, № 2. [Электронный ресурс] URL: https://knio.ru/PDF/03KN225.pdf

4. Пашали Д.Ю., Бывальцев А.Е., Афанасьев Ю.В. Влияние сверхмалых магнитных аномалий на полет беспилотного летательного аппарата. Физико-математическое моделирование систем: материалы XXVI Международного семинара [Электронный ресурс] 2025. С. 11-17. [Электронный ресурс] URL: https://fmms.cchgeu.ru/materialy-seminara/ФММС-26 (Воронеж,%2030%20ноября%202024).pdf (дата обращения 7.04.2026).

© Бывальцев А.Е., 2026

УДК 621.313

А.Е. БЫВАЛЬЦЕВ
*byvaltsev_2001@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ФЕРРОПОРОШКОВЫЕ ТОРМОЗА ДЛЯ СТЫКОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Аннотация.* Рассматриваются подходы и итоги исследования механических характеристик тормозов в переходных процессах при стыковке в лабораториях кафедры электротехники и электротехнологий, применения технологии с осциллографом Rigol DS 1054 Z и возможность использования ферропорошковых тормозов в стыковочных устройствах. Дана конструкция демпфера и составы наполнителей, перспективных для использования в облегчённом варианте без фрикционных тормозов.

*Ключевые слова:* стыковка, космические аппараты, пружинный механизм, амортизатор, электромагнитные тормоза, краевой эффект, нагрев ротора, ферропорошок, смазка.

На кафедре электротехники и электротехнологий в продолжение тематики кафедры электромеханики ведутся исследования в области разработки теории и практики стыковочных устройств космических аппаратов.

Основой стыковочного устройства (СТУ) является элемент, поглощающий энергию – амортизатор. В СТУ применяются следующие типы энергопоглощающих элементов: 1) пружинные механизмы; 2) пневмо-, гидроамортизаторы; 3) фрикционные и электромеханические тормоза [2].

Рассмотрим работу СТУ, основными энергопоглощающими элементами которого являются электромеханические демпферы и работающие с ними пружинные механизмы и фрикционные тормоза.

Для исследования характеристик представляет сложность измерение момента тормозов, развиваемого в процессе стыковки, связанная с динамичным нагревом ротора. Для этого разработан стенд, позволяющий разгонять тормоз до максимальной скорости за доли секунды и производить замер тормозного момента при установившейся скорости за 1-2 с, при этом ротор за это время нагревается на 100-150 °С, и, соответственно, уменьшается электрическая проводимость ротора. Как следствие по средним показателям при нагреве на 100 °С начальная крутизна моментной характеристики уменьшается более, чем на 35% [2].

В основу разработанного стенда положено применение осциллографа Rigol DS 1054 Z. Это позволяет записывать полученные кривые, анализировать их визуально и, что очень важно при многочисленных отладочных пробах,

получать цифровые значения диагностических характеристик. Для оценки эффективности тормоза в его специфическом режиме работы, кривая выбега дифференцируется соответствующей опцией Rigol, и в точке максимума производной умножается (масштабируется) на коэффициент, пропорциональный суммарному моменту инерции роторов: двигателя + тормоза + электромагнитной муфты, что даёт возможность определять с высокой точностью пиковое значение развиваемого тормозного момента [1].

Продолжается поиск конструкций СТУ, имеющих меньший по сравнению с действующими вес и габариты и не уступающих по энергетическим показателям. В современных отечественных СТУ используются электродинамические тормоза, т.е. в начальной стадии стыковки, работает электромеханическое демпфирование. Энергия соударения передаётся через шарико-винтовой преобразователь на электромагнитные тормоза. При этом момент торможения в отличие от [2] моет быть определён с учётом полной конфигурации ротора может быть определен по следующему выражению [3].

$$M = M_m \cdot m_j;$$

$$M_m = p\frac{B_{\delta m0}^2}{2\mu_0 k_d}\pi Da\Delta;$$

$$m_j = \frac{2\varepsilon_1\left(1+\varepsilon_1^2 k^2\right)}{\left(1+\varepsilon_1^2 k\right)^2};$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon k_\sigma;$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau};$$

$$k_\sigma = 1 - \frac{th(\alpha a)}{\alpha a}\cdot\frac{2k_i k_j th(\alpha a) + k_i + k_j}{\left(1+k_i th(\alpha a)\right)\left(k_j + th(\alpha a)\right)+\left(1+k_j th(\alpha a)\right)\left(k_i + th(\alpha a)\right)}$$

где $k_\sigma$ – коэффициент уменьшения электрической проводимости ротора из-за поперечного краевого эффекта;

$k$ – коэффициент, характеризующий явнополюсность индуктора;

$\varepsilon$ – магнитное число Рейнольдса;

$m_j$ – относительный момент;

$p$ – число пар полюсов4

$B_{\delta m0}$ – амплитуда магнитной индукции начального поля;

$\mu_0$ – магнитная проницаемость вакуума;

$D$ – средний диаметр полого ротора;

$a$ – половина активной длины ротора;

$k_d$ – коэффициент приведения по продольной оси;

$\Delta$ – толщина ротора в активной области;

$M_m$ – базовый момент демпфера;

$M$ – электромагнитный момент демпфера,

$k_i$, $k_j$ – коэффициенты, характеризующие конфигурацию и проводимость вылетов, прилегающих к активной области с левой и правой стороны, соответственно;

$\tau$ – полюсное деление;

$\alpha$ – коэффициент полюсной дуги.

При этом комплекс работает в связке с пружинным механизмом и самонастраивающимся фрикционным тормозом [2].

Эта система может быть существенно упрощена использованием ферропорошкового тормоза, конструкция которого обеспечивает минимальный начальный момент и плавное нарастание момента до полной остановки [5]. С одним из вариантов такого тормоза [4] проведём сравнение, причём рассмотрим один из наиболее характерных примеров [3,4,5,6,7,8].

Известна конструкция ферропорошкового тормоза (рис. 1).

При входе в работу тормоза возвратная пружина 7 удерживает магнитопровод 6 в исходном положении и обеспечивает тем самым максимальную величину магнитного сопротивления на участке повышенного магнитного сопротивления. Вращение от механизма преобразования поступательного движения амортизатора во вращательное (на чертеже не показан) передаётся ротору 3. Тормозной момент при скорости вращения ротора близкой к нулю обуславливается минимальным значением индукции в зазоре, максимальным значением величины магнитного сопротивления на участке L и имеет минимальную величину. Под действием этого момента магнитопровод 6 увлекается ротором, закручивая возвратную пружину 7. Вращательное движение магнитопровода 6 преобразуется в поступательное движение втулки 8 с помощью шарико-винтового преобразователя 9. Это приводит к автоматическому уменьшению величины магнитного сопротивления на участке L, увеличению индукции в зазоре и, как следствие, к интенсивному нарастанию тормозного момента [4].

Начальный тормозной момент такого тормоза обусловлен суммой моментов: от инерционной массы, трения в уплотнителях, удерживающих ферропорошок в рабочей зоне, момента трения в подшипниках ротора и от контакта ротора с порошком, уплотнённом остаточным магнитным полем.

При входе тормоза в работу усилие, действующее на ротор и другие связанные с ним конструктивные элементы, значительно снижается за счёт малой величины тормозного момента. Тормозной момент, таким образом, в зоне ударного входа в работу имеет плавно нарастающий вид. Благодаря этому в сравнении с известными электромагнитными порошковыми тормозами время наработки предлагаемой конструкции тормоза увеличено в 12-14 раза при одинаковых частоте срабатывания и предельных нагрузках.

Эффективность торможения (произведение момента на время активной работы тормоза) возрастает в 1,5-1,65 раза.

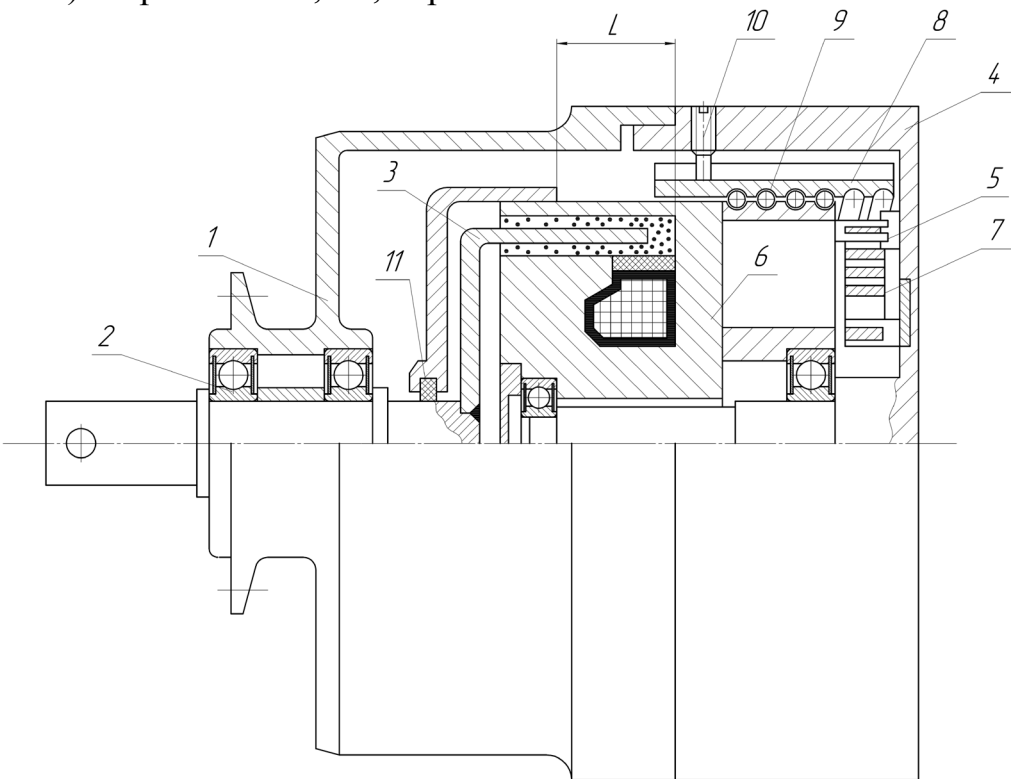



*Рис. 1.* Ферропорошковый тормоз:
1 – корпус, 2 – подшипники, 3 – ротор, 4 – фланец, 5 – упоры-ограничители, 6 – магнитопровод, 7 – возвратная спиральная пружина, 8 – втулка-шунт из магнитомягкого материала, 9 – шарико-винтовой преобразователь, 10 – палец, 11 – уплотнение

Для безударного входа в состав наполнителя вводятся компоненты, сохраняющие свои характеристики при условиях работы в космосе. Это, например, карбонильное железо с тонкодисперсным стеклом. Объёмная доля и тип смазки для заданных условий применения изначально заимствуются из рекомендаций для других смежных систем, работающих в условиях космоса, общеинженерных наработок других авторов [9,10].

*Таблица 1*

Коэффициент наполнителя

| | Состав наполнителя | $k_m$ |
|---|---|---|
| | Карбонильное железо 6-12 мкм без наполнителя | 1,4 |
| | Карбонильное железо и окись цинка с $k_p$=0,5-0,65 | 1,1 |
| | Карбонильное железо и окись магния с $k_p$=0,5-0,65 | 1,15 |
| | Карбонильное железо и тонкодисперсное стекло с $k_p$=0,5-0,65 | 1,2 |
| | Распылённая сталь 3Х13 25-40 мкм и окись цинка с $k_p$=0,5-0,65 | 1 |

| | | |
|---|---|---|
| | | ,1 |
| | Карбонильное железо марки Р8 и масло вакуумных насосов | 0<br>,41 |
| | Карбонильное железо марки Р4 и трансформаторное масло | 0<br>,45 |

Характеристики ферропорошковых тормозов существенно зависят от состава и качества наполнителей (см. табл. 1). Тормозной момент зависит от коэффициента наполнителя прямо пропорционально. Могут использоваться смазки с синтетическими пластичными смазочными материалами на основе кремний-органических соединений. Эти материалы имеют низкую испаряемость в вакууме, высокие защитные свойства от атмосферной коррозии. Температура их застывания составляет -60…-70 °С. Однако моменты трогания узлов начинают увеличиваться и при меньших отрицательных температурах.

К уплотнению рабочей зоны ферропорошкового тормоза предъявляются повышенные требования по надёжности и малой величине утечки наполнителя (порошка и смазки). Для выполнения указанных требований уплотнение может быть выполнено в виде двух дублирующих концентрических прокладок цилиндрического или торцового типа.

Представляет интерес провести сравнение систем демпфирования с электродинамическим тормозом +пружинным механизмом+фрикционный тормозом с системой, состоящей из облегченного пружинного механизма и ферропорошкового тормоза.

При использовании ферропорошковых тормозов, момент на валу может быть рассчитан

$$M_н = \frac{\pi}{2} \cdot k_{ржс} \cdot b_\delta \cdot k_з \cdot m \cdot D_\delta^2 \cdot \tau_\delta ,$$

где $M_н$ – номинальный вращающий момент при номинальном токе возбуждения, кГ·см;

$k_{ржс}$ – коэффициент режима работы;

$b_\delta$ – ширина рабочего зазора, м;

$k_з$ – коэффициент, учитывающий влияние числа зазоров на плотность наполнителя;

$m$ – число зазоров;

$D_\delta$ – средний диаметр ЭПМ по рабочим зазорам, м;

$\tau_\delta$ – удельное усилие сцепления или удельное усилие сопротивления сдвигу в рабочем зазоре, кГ/см$^2$.

Таким образом, можно подвести некоторый итог о возможности использования ферропорошкового тормоза в качестве основного демпфирующего элемента со связью с шарико-винтовым преобразователем через пружинный механизм, в функции которого необходимо заложить устранение ступенчатости начального момента тормоза. Для исключения

поломок деталей и систем шарико-винтового преобразователя уровень сглаживания «ступеньки» начального момента не должен превышать уровень «ступеньки» при использовании электродинамического тормоза. При этом массогабаритные показатели пружинного механизма не должны превысить 25% старой конструкции. К такому выводу приводят сравнительные расчёты порогов переходных процессов от электродинамического демпфера к фрикционному тормозу. Последующие работы по исследованию и проектированию такого рода систем ведутся, и на этапе технического предложения предполагается провести испытания макетов в условиях лаборатории кафедры.

**Библиографический список**

1. Пашали Д.Ю., Бывальцев А.Е. Стенд для исследования магнитоэлектрических демпферов. Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции (г. Уфа, 24–28 ноября 2025 г.) / отв. ред. А.В. Лобанов / в 8 т. Т. 3 [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025. – 393-395 с. – URL: https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2025/404.pdf (дата обращения 4.05.2026).

2. Сыромятников В. С. Стыковочные устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.

3. Афанасьев Ю. В. Исследование электродинамических демпфирующих элементов систем управления амортизаторами: дис. канд. техн. наук. Уфимский авиационный институт, Уфа, 1976.

4. Хайруллин, И. Х. Электромагнитный порошковый тормоз / И. Х. Хайруллин, В. С. Сыромятников, Ю. В. Афанасьев, Н. А. Афанасьева и Р. Н. Султангалеев / АС № 863920 СССР, F 16 D 37/02, БИ № 34, опубл. 25.12.79.

5. Хайруллин, И. Х. Электромагнитный порошковый тормоз с самовозбуждением / И. Х. Хайруллин, Ю. В. Афанасьев, В. С. Сыромятников, Ш. Г. Исмагилов, Н. К. Потапчук и В. Н. Филиппов / АС № 623027 СССР, F 16 D 37/02, БИ № 33, опубл. 28.06.76.

6. Хайруллин, И. Х. Переменнополюсная электромагнитная порошковая муфта / И. Х. Хайруллин, В. С. Сыромятников и Н. К. Потапчук / АС № 976145 СССР, F 16 D 37/02, БИ № 43, опубл. 18.01.80.

7. Хайруллин, И. Х. Электромагнитный порошковый многополюсный тормоз / И. Х. Хайруллин, В. С. Сыромятников, Ш. Г. Исмагилов, В. Ц. Зориктуев и П. С. Балыкин / АС № 935664 СССР, F 16 D 37/02, БИ № 22, опубл. 15.06.82.

8. Хайруллин, И. Х. Ферропорошковая муфта / И. Х. Хайруллин, В. С. Сыромятников, Н. К. Потапчук и Ш. Г. Исмагилов / АС № 916803 СССР, F 16 D 37/02, БИ № 12, опубл. 30.03.82.

9. Могилевский В. Г. Электромагнитные порошковые муфты и тормоза. М.-Л.: Энергия, 1964. 104 с.

10. Воробьева Т. М. Электромагнитные муфты. М.: Энергия, 1960. 207 с.

© Бывальцев А.Е., 2026

УДК 536.2:621.3.04

Д.А. БОЧКОВ
*Dmitry.bochckow@yandex.ru@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент. О.А. ЮШКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОСНОВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО КАБЕЛЯ

*Аннотация*. В данной статье рассчитана средняя температура основной изоляции кабеля, который работает по принципу сверхпроводимости.

*Ключевые слова*: электроэнергетика, сверхпроводники, кабель, сверхпроводимость.

Разработка высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) кабелей считается одним из самых многообещающих векторов модернизации электроэнергетики. Такие кабели позволяют многократно нарастить пропускную способность линий электропередачи, одновременно сократив потери энергии. Однако практическая ценность и отказоустойчивость этих систем находятся в прямой зависимости от соблюдения строгих криогенных температур. Ключевую роль здесь играет основная электрическая изоляция. В конструкциях высоковольтных ВТСП-кабелей её традиционно формируют из бумаги с пропиткой жидким азотом либо из полимеров, и она функционирует в температурном коридоре 65–80 К.

Эксплуатация такой изоляции осложняется наличием температурного градиента по толщине диэлектрика. Это явление вызвано неравномерным охлаждением потоком хладагента, притоком тепла извне и механическими нагрузками на изоляционный слой. Градиент напрямую сказывается на электрической прочности диэлектрика, так как ключевые характеристики материалов — диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь и электрическая прочность — сильно зависят от температуры в криогенном диапазоне. Из этого следует, что точный расчёт средней температуры изоляции выступает обязательным промежуточным этапом при проектировании высоковольтного ВТСП-кабеля.

В качестве материала для проводящей части ВТСП-кабеля используются композитные материалы на основе редкоземельных металлов, таких как иттрий или гадолиний. Сама проводящая часть представляет собой множество пластичных металлических лент, на которые наносятся сверхпроводник, обматывая формера кабеля. Эти ленты, в зависимости от конструкции кабеля, могут быть намотаны в несколько слоёв. В итоге получается тонкое проводящее покрытие, которое сохраняет свойства сверхпроводимости при температуре жидкого азота с высокой плотностью тока до 30 кА/мм². Сам же

кабель находится в среде из хладагента, в роли которого выступает жидки азот, охлаждая кабель снаружи. Формер кабеля служит для поддержания механической прочности кабеля и расположен в его центре.

Для стабильной работы кабеля требуется поддержание необходимой температуры не только для сверхпроводящих жил, но и для остальных частей кабеля, включая его основную изоляцию. В ходе эксплуатации кабеля в этой части выделяется тепловая энергия, несмотря на высокое удельное сопротивление изоляции. Ниже приведена математическая модель расчёта температуры изоляционного слоя ВТСП-кабеля. В ней рассматривается исполнение кабеля в виде двух колец – центрального, где находится сам проводник, и внешнего, где находится хладагент. Анализ модели выполнен с учётом особенности полимерной изоляции – повышение теплопроводности с ростом температуры, что вызывает снижение перепада температур между внешним и внутренним слоем изоляции.

Представим слой изоляции кабеля как полый цилиндр. Для внешней поверхности изоляции с большим радиусом ($r_1$) зададим плотность теплового потока $q$. Сам теплообмен осуществляется через термические сопротивления на внутренней поверхности $R_0^*$ и внешней поверхности $R_1^*$. Также примем температуры между слоями изоляции и средами, в которых они находятся - $T_0^*$ - температура в слое изоляции меньшего радиуса ($r_0$), $T_1^*$ - температура в слое изоляции большего радиуса. Допустим, что потенциалы на каждом слое электрической изоляции кабеля равны, поэтому температуру изоляции по всей длине кабеля можно считать одинаковой, следовательно, температура зависит только от радиуса $r$, где измеряется температура. Запишем дифференциальное уравнение, исходя из данных, выявленных выше:

$$\frac{1d}{rdr}\left(rR\lambda(T)\frac{dT(r)}{dr}\right) + qv(T,r) = 0, r \in (r_0; r_1),$$

$$\lambda(T)\frac{dT(r)}{dr}\Big|_{r=r_0} = \frac{T(r_0)-T_0^*}{R_0}, \lambda(T)\frac{dT(r)}{dr}\Big|_{r=r_1} = \frac{T(r_1)-T_1^*}{R_1},$$

где $\lambda$ —коэффициент теплопроводности диэлектрика;

$qv$ —объемная мощность энерговыделения.

Согласно условию сохранения электрических зарядов в диэлектрике: $j(r)r = j_0r_0 = \text{const}$, где $j_0=j(r_0)$, где $j(r)$ – плотность тока в точке изоляции. Тогда для мощности тепловыделения в изоляционном слое кабеля будем зависеть от удельного электросопротивления $\rho$(T), зависящего от температуры. При постоянной разности потенциалов между внешних и внутренних слоев изоляции справедливо равенство $qv(T,r) = \rho(\mathrm{T})(j_0r_0/r)^2$, которое позволяет привести первоначальное уравнение к виду:

$$r\frac{d}{dr}\left(r\lambda(T)\frac{dT(r)}{dr}\right) + (j_0r_0)^2\rho(\mathrm{T}) = 0, r \in (r_0; r_1).$$

Данное уравнение является нелинейным, из-за чего его решение не получится представить относительно распределения температуры $T$(r). Поэтому построим интегральное соотношение, которое свяжет зависимости с температурой внутри изоляции.

Допустим, что $r\lambda(T)dT(r)/dr = p$, тогда дифференциальное уравнение можно записать как интеграл:

$$\left(r\lambda(T)\frac{dT(r)}{dr}\right)^2 = C - 2(j_0 r_0)^2 \int_{T_0}^{T} F(T')dT',$$

где $T_0 = T(r_0)$; $F(T) = \lambda(T)\rho(T)$. Использовав первое граничное условие, найдем константу:

$$C = (T_0 - T_*)^2 (r_0/R_0)^2$$

и подставим её в первый интеграл:

$$r\lambda(T)\frac{dT(r)}{dr} = \pm\left(\left(\frac{T_0 - T_*}{r_0/R_0}\right)^2 - 2(j_0 r_0)^2 \int_{T_0}^{T(r)} F(T')dT'\right)^{1/2}.$$

Знак в правой части уравнения зависит от температур внешнего и внутреннего слоя изоляции. Для решения данной задачи введём значение температуры внешней изоляции при идеальной теплоизоляции $T_1$. Тогда получаются два варианта развития событий: теплоотвод происходит через внутреннюю поверхность изоляции: $T_1^* \geq T_1^{\square}$ и теплоотвод происходит через внешнюю поверхность изоляции: $T_1^* < T_1^{\square}$. Согласно конструкции кабеля, отвод тепла идёт только через внешний слой изоляции, поэтому для дальнейших расчётов будем использовать второй вариант.

Если $T_1^* < T_1^{\square}$, то в некотором интервале $(r_0; r_1)$ существует точка $r^*$, где производная $dT(r)/dr$ равна нулю. Тогда она меняет свой знак на отрицательный — то есть меняет свой знак в правой части уравнения на «-». В этом случае константа $C = 0$ и из первого интеграла и граничного условия следует:

$$\left(\lambda(T)\frac{dT(r)}{dr}\bigg|_{r=r_1}\right)^2 = (j_0 r_0 U_*)^2 = 2(j_0 r_0)^2 \int_{T_*}^{T_0^{\square}} F(T)dT,$$

Что позволяет получить интегральное соотношение для значения $T_*$:

$$2\int_{T_*}^{T_0^*} F(T)dT = U_*^2.$$

При $T_1^* < T_1^{\square}$ находим:

$$\int_{T_0}^{T(r)} \left(\left(\frac{T_0^* - T_0}{\frac{R_0}{r_0}}\right)^2 + 2(j_0 r_0)^2 \int_{T_0}^{T} F(T')dT'\right)^{-1/2} \lambda(T)dT = \ln\frac{r}{r_0}$$

причем с учетом граничного условия

$$j_0 r_0 = \frac{T_1^* - T_1}{U_* R_1/r_1} - \frac{T_0 - T_0^*}{U_* R_0/r_0},$$

где $T_1 = T(r_1)$. Из уравнения, граничного условия и равенства получим соотношение:

$$2\int_{T_0}^{T_1} \left(\left(\frac{T_0 - T_0^*}{R_0/r_0}\right)^2 + 2(j_0 r_0)^2 \int_{T}^{T_0} F(T')dT'\right)^{-1/2} \lambda(T)dT = \ln\frac{r}{r_0},$$

которое определяет связь температур на внешнем и внутреннем слоях изоляции.

При $T(r_1) = T_1$ получается интегральное соотношение, которое позволяет вычислить значения температуры на внутреннем и внешнем слоях изоляции, а с использованием полученных формул данное соотношение позволяет найти температуру $T(r)$ в любой точке изоляции.

Формула интегрального соотношения для вычисления значения $T_*$ справедлива для всех слоёв электроизоляции и изначально заданными температурами при идеальной тепловой изоляции одной из поверхностей диэлектрика. Представим изоляцию в виде полого цилиндра с идеально теплоизолированной поверхностью между поверхностями этого цилиндра, тогда можно записать:

$$U_0 = (2\int_{T_0}^{T^*} F(T)dT)^{1/2}, U_1 = (2\int_{T_1}^{T^*} F(T)dT)^{1/2},$$

где $U_0+U_1=U_*$. Тогда для рассматриваемых слоев будут справедливы равенства:

$$j_0 r_0 (2\int_{T_0}^{T^*} F(T)dT)^{1/2} = \frac{T_0 - T_0^*}{R_0/r_0},\ j_0 r_0 (2\int_{T_1}^{T^*} F(T)dT)^{1/2} = \frac{T_1 - T_1^*}{R_1/r_1}.$$

Из уравнения сохранения тепловой энергии для полого цилиндра:

$$(j_0 r_0 U_*)^2 = (\frac{T_0 - T_0^*}{R_0/r_0} + \frac{T_1 - T_1^*}{R_1/r_1})^2.$$

Следовательно, Исключив из этих двух равенств произведение $j_0 r_0$ запишем интегральное соотношение:

$$2\int_{T_0}^{T_1} F(T)\,dT - U_*^2 \frac{r_0(T_0 - T_0^*)/R_0 - r_1(T_1 - T_1^*)/R_1}{r_0(T_0 - T_0^*)/R_0 + r_1(T_1 - T_1^*)/R_1} = f_1(T_0, T_1) = 0,$$

которые напрямую связывают значения температур на разных поверхностях исходного цилиндра с постоянной разностью потенциалов на этих поверхностях.

Из первого соотношения исключим произведение $j_0 r_0$ и получим интегральное соотношение, которое устанавливает связь между $T_0$, $T_1$ и $T^*$:

$$\frac{2}{U_*^2}(1 - \frac{(T_1 - T_1^*)r_0/R_0}{(T_0 - T_0^*)r_0/R_0})^2 \int_{T_0}^{T^*} F(T)dT - 1 = f_2(T_0, T_1, T^*) = 0.$$

Допустим, что распределение температуры внутри слоя будет однородным, тогда уравнение баланса энергии будет иметь вид:

$$r_0 \frac{T_m - T_0^*}{R_0} + r_1 \frac{T_m - T_1^*}{R_1} = U_* j_0 r_0 = \rho(T_m)(j_0 r_0)^2 \ln\frac{r}{r_0},$$

где $T_\text{m}$ — средняя температура этого слоя, не зависящая от коэффициента теплопроводности материала слоя. Отсюда

$$T_m = \frac{T_0^* r_0 R_1 - T_1^* r_1 R_0}{R_0 r_1 + R_1 r_0} + \frac{U_*^2 R_0 R_1}{\rho(T_m)\ln\frac{r}{r_0}(R_0 r_1 + R_1 r_0)}.$$

Принимаем следующие значения для расчёта средней температуры: $T_1^* = 70$ К, $T_0^* = 90$ К $R_0 = R_1 = 0{,}269, r_0 = 0{,}02$ м, $r_1 = 0{,}03$ м.

$$T_m = \frac{90*0{,}02*0{,}269 - 70*0{,}03*0{,}269}{0{,}269*0{,}03 + 0{,}269*0{,}02} + \frac{20^2*0{,}269*0{,}269}{\rho(T_m)\ln 1{,}5(0{,}269*0{,}03 + 0{,}269*0{,}02)} = 82{,}46 \text{ К}.$$

Для принятых исходных данных получим, что средняя температура изоляции составляет 82,46 К (-190,7 $^0$C). Такая температура входит в диапазон

рабочих температур для высокотемпературных сверхпроводников (70-100 К), однако данная температура превышает температуру кипения жидкого азота (77 К), из-за чего происходит нагрев жидкого азота и переход его в газообразное состояние. Для того, чтобы избежать этого, азот постоянно циркулирует внутри кабеля через насосы, расставленные по концам кабеля. Также для некоторых сверхпроводящих материалов такая температура является выше критической, из-за чего материал теряет свои свойства сверхпроводимости. Также из-за такой низкой температуры может случиться пробой изоляции, поэтому необходимо использовать диэлектрики, которые могут работать при данной температуре.

Полученная температура является довольно реалистичной при начальных условиях, но граничной для стабильной работы криостата с жидким азотом, сверхпроводящего материала и материала изоляции. Для практической эксплуатации такого кабеля рекомендуется либо принять меры по снижению температуры хладагента, либо использование сверхпроводника с высокой критической температурой.

## Библиографический список

1. Температурное состояние слоя электроизоляции сверхпроводящего кабеля постоянного тока при двустороннем охлаждении, В.С. Зарубин, Г.Н. Кувыркин, И.Ю. Савельева. – Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки» 2021 год, номер 4 (97).

2. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛИ. ПРОЕКТ ВТСП КЛ ПО СОЕДИНЕНИЮ ПС 330 КВ ЦЕНТРАЛЬНАЯ И ПС 220 КВ РП-9 В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ – «Энергия единой сети» №3 (32) июнь-июль 2017.

3. Математическая модель расчета остаточного ресурса сшитой полиэтиленовой изоляции кабелей Д.А. Поляков. – Омский научный вестник. 2017 год, номер 4 (154).

© Бочков Д.А., 2026

УДК 621.43.04.

Б.Е. БОГДАНОВ
*bogdanovbogdan2001ufa@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

# АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

*Аннотация*. Рассматривается актуальность применения плазменных системы зажигания в авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) и взлётно-силовых установках (ВСУ).

*Ключевые слова*: зажигание, плазменная система, истребитель, газотурбинный двигатель, авиация.

Обозначим, что такое плазменная система зажигания. Согласно [1] это – генератор плазменной струи постоянного или переменного тока, воспламеняющий горючую смесь.

Согласно [2] ГТД – это тепловая машина, предназначенная для преобразования энергии сгорания топлива в кинетическую энергию реактивной струи и/или в механическую работу на валу двигателя.

Согласно [3] Взлётно-силовая установка (ВСУ) – это комплекс систем и устройств, обеспечивающих создание тяги, необходимой для взлёта, полёта и посадки летательного аппарата (ЛА). Они включают двигатели, системы их питания, управления, охлаждения, а также вспомогательные системы

Плазменные системы зажигания нашли широкое применение в современных ГТД, в частности, и ВСУ в составе авиации различного назначения: самолёты общего, специального назначения, служебные, региональные, и т. д. [4,5,6]. Такая система зажигания эффективна при необходимости обеспечения запусков ГТД без кислородной подпитки, при необходимости расширения пусковых характеристик камер сгорания в сложных условиях эксплуатации. Например, в турбореактивного двухконтурного двигателе АЛ‑41Ф‑1С [7] (рис.1).

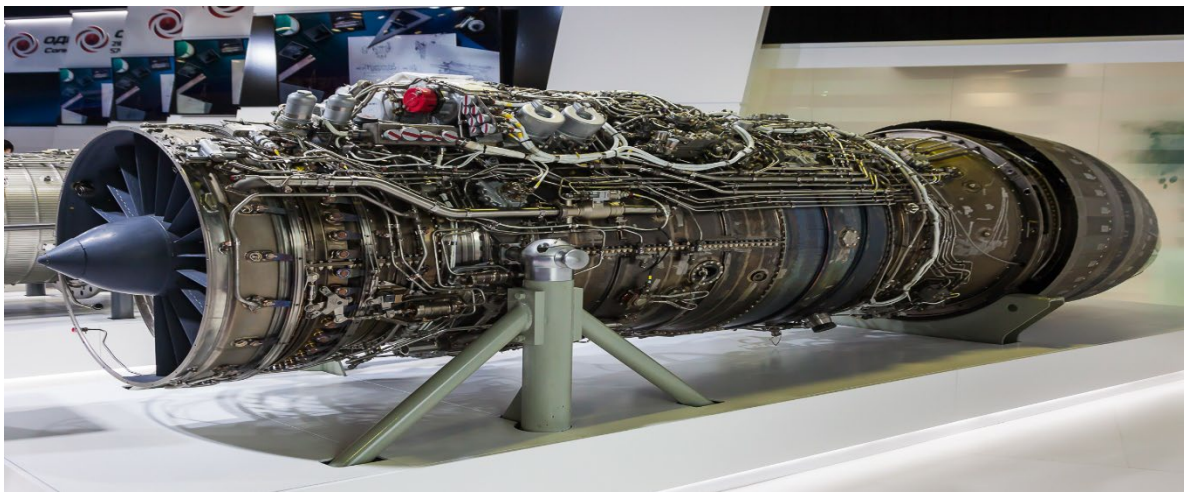


*Рис.1*. Двигатель АЛ‑41Ф‑1С

Такая система зажигания применяется в самых современных самолетах. Например, СУ-57 [8] – многоцелевой истребитель пятого поколения. Предназначен для завоевания господства в воздухе, уничтожения всех видов воздушных целей, поражения наземных и надводных целей, нейтрализации систем противовоздушной обороны противника, ведения разведки и радиоэлектронной борьбы. Способен осуществлять мониторинг воздушного пространства на больших удалениях от места базирования и разрушать системы управления вражеской авиацией. (рис. 2).



*Рис. 2*. СУ-57

Пример типовой электрической схемы плазменного зажигания с плазменной свечой. (рис. 3).

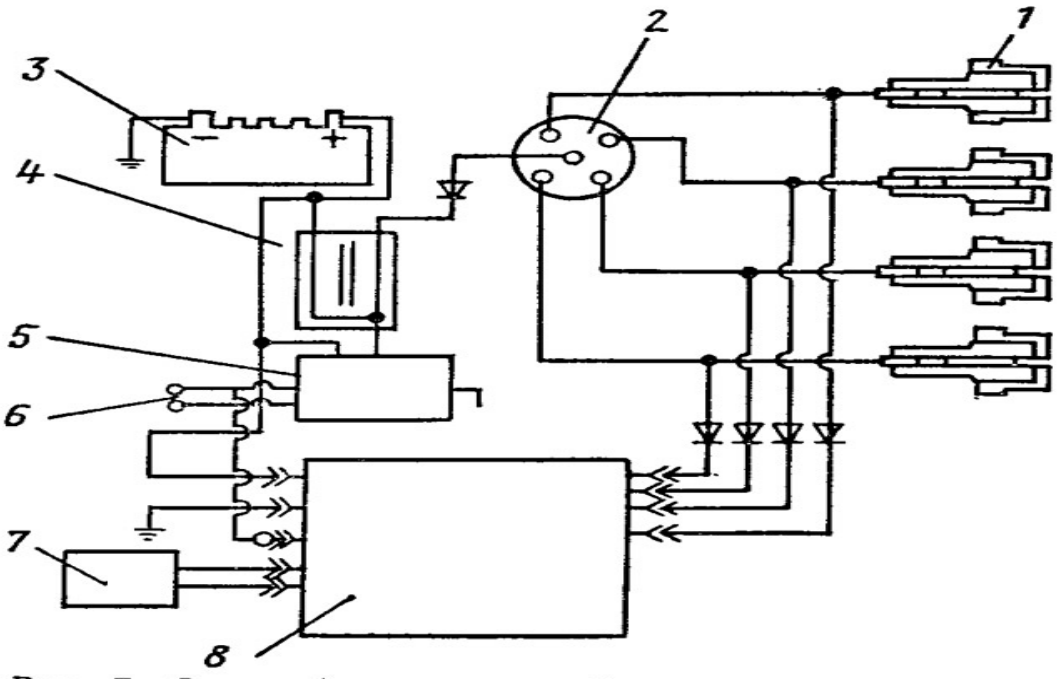



*Рис. 3.* Схема плазменного зажигания с плазменной свечой

Исходя из [9] Плазменные системы зажигания входят в разработку будущих двигателей для истребителей пятого поколения.

При создании перспективного авиационного комплекса фронтовой авиации (ПАК ФА) была поставлена задача обеспечить бескислородный запуск двигателя. Плазменная система зажигания установлена в основной камере сгорания и в форсажной. Новшество заложено в самой форсунке с плазменной системой: в ней одновременно с подачей керосина организуется дуга плазмы.

До сих пор во всех системах розжига для повышения высотности и возможности запуска двигателей в полете применялась кислородная подпитка, которая требовала наличия соответствующей кислородной системы на борту и инфраструктуры на аэродроме

Таким образом, установлено, что плазменные системы зажигания в ГТД и ВСУ широко используется в военной авиации, в частности в истребителях пятого поколения. Исследования в данной области являются актуальной научно-технической задачей.

Личный вклад автора. Разработан плазменный агрегат зажигания для ГТД с характеристиками, повышающими надежность искрообразования, и увеличенной длительностью непрерывной работы, с меньшими габаритами и массой. Технические характеристики разработанного плазменного агрегата зажигания для ГТД согласно ОСТ 1 02526-84 указаны в таблице 1.

*Таблица 1*

Характеристики разработанного плазменного агрегата зажигания для ГТД согласно ОСТ 1 02526-84

| Наименование параметра | Значение параметра |
|---|---|
| Напряжение питания (диапазон), В по ГОСТ Р 54073-2017 | 27 (14÷30) |
| Частота искрообразования, Гц. | 10÷15 |
| Энергия, запасаемая в накопительном конденсаторе, Дж | 5 |

## Библиографический список


1. ГОСТ 22606–77. Системы зажигания авиационных газотурбинных двигателей электрические. Термины и определения.
2. Газотурбинный двигатель [Электронный ресурс] URL: https://bigenc.ru/c/gazoturbinnyi-dvigatel-2364fe (дата обращения 13.04.2026).
3. Взлётно-силовая установка [Электронный ресурс] URL: https://studfile.net/preview/7740129/page:5/ (дата обращения 14.04.2026).
4. Pratt & Whitney GTF™ [Электронный ресурс] URL: https://www.prattwhitney.com/en/products/commercial-engines (дата обращения 15.04.2026).
5. Pratt & Whitney PW4062/F139 [Электронный ресурс] URL: https://www.prattwhitney.com/en/products/military-engines (дата обращения 16.04.2026).
6. Pearl 10X [Электронный ресурс] URL: https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/business-aviation/pearl-10x.aspx#section-overview (дата обращения 16.04.2026).
7. Двигатель АЛ‑41Ф‑1С [Электронный ресурс] URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/АЛ-41Ф1?ysclid=momz55wsbi499010937 (дата обращения 19.04.2026).
8. Плазменный мотор N+1 поговорили с разработчиком «Изделия 30» для истребителя СУ-57 [Электронный ресурс] URL: https://nplus1.ru/material/2019/03/06/engines (дата обращения 18.04.2026).
9. Разработчик: бескислородный запуск двигателя реализован в ПАК ФА [Электронный ресурс] URL: https://www.aviaport.ru/news/327505/ (дата обращения 20.04.2026).


© Богданов Б.Е., 2026

УДК 621.313.13

Д.С. БОРОДИН
*dborodin54@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Д.Р. ФАРРАХОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ ДЛЯ АКСИАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Аннотация*. В данной статье рассматриваются конструкции обмоток статоров на печатной плате для аксиальных двигателей, рассмотрены концентрические спиральные обмотки, волновые обмотки, неперекрывающиеся и перекрывающиеся обмотки фаз, методы соединений катушек, а также конструкция статора с сердечником и без сердечника.

*Ключевые слова*: аксиальный электродвигатель; конструкции аксиальных электродвигателей; печатный статор; конструкция обмотки печатного статора.

**Введение**

В аксиальных двигателях обмотка статора на печатной плате (далее - *PCB*) определяет электромагнитные, тепловые и механические параметры машины. По сравнению с традиционной обмоткой, технология *PCB* обеспечивает точность позиционирования проводников, гибкость в изменении их формы и ширины, а также высокую повторяемость в серийном производстве.

Но проектирование *PCB* обмотки требует учета множества факторов, поскольку выбранная топология напрямую влияет на величину противо-ЭДС, крутящий момент, потери и пульсаций. В данной статье рассматриваются основные виды конструкций *PCB* обмоток, их соединения.

**1. Классификация основных конструкций *PCB* обмоток**

**1.1. Концентрические спиральные обмотки**

Это подход, при котором каждая катушка наматывается по спирали вокруг своего центра, занимая площадь, соответствующую одному пазу.

Проводники обычно выполняются в форме трапеции или ромба для максимального заполнения сектора [2, 5]. Дорожки меди идут по спирали от внешнего радиуса к центру или наоборот. В центре катушки расположено переходное отверстие, которое соединяет спираль с аналогичной спиралью на соседнем слое *PCB*, обеспечивая последовательное или параллельное соединение витков [2].

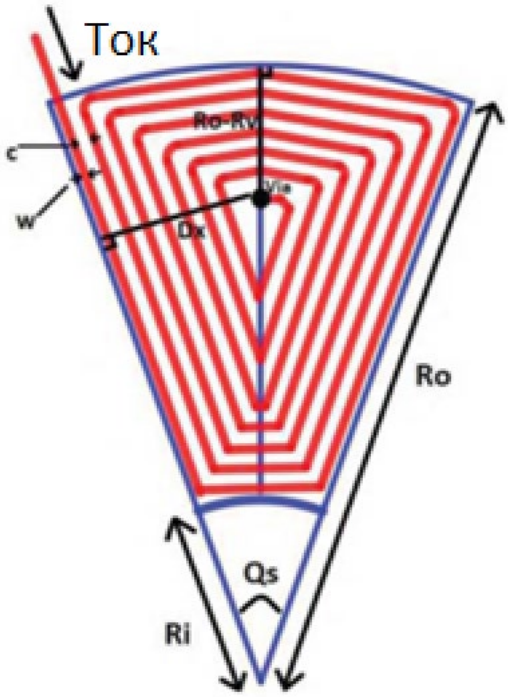



*Рис. 1.* Концентрическая спиральная обмотка

Преимуществом является технологическая простота проектирования и производства, геометрия подходит для двигателей малой мощности [2].

Однако витки катушки имеют разную длину и охватывают разную площадь магнитного потока. Внутренние витки создают меньшую ЭДС, чем внешние, что снижает общий коэффициент обмотки и приводит к неоптимальному использованию меди [1]. Значительные лобовые части на внутреннем и внешнем диаметрах также увеличивают сопротивление.

**1.2. Волновые обмотки**

В волновой обмотке проводники не формируют локальных спиралей, а проходят волнообразно через всю окружность статора, последовательно соединяя активные стороны, расположенные под разными магнитными полюсами.

Активные проводники радиально расходятся от центра к внешнему диаметру, а лобовые соединения располагаются на внутреннем и внешнем диаметрах, формируя "волну" [1, 3].

Эта конструкция обеспечивает максимальное заполнение площади статора медью, поскольку практически вся поверхность платы используется для активных проводников. Кроме того, это позволяет легко реализовать распределенную обмотку с равномерным потокосцеплением [1].

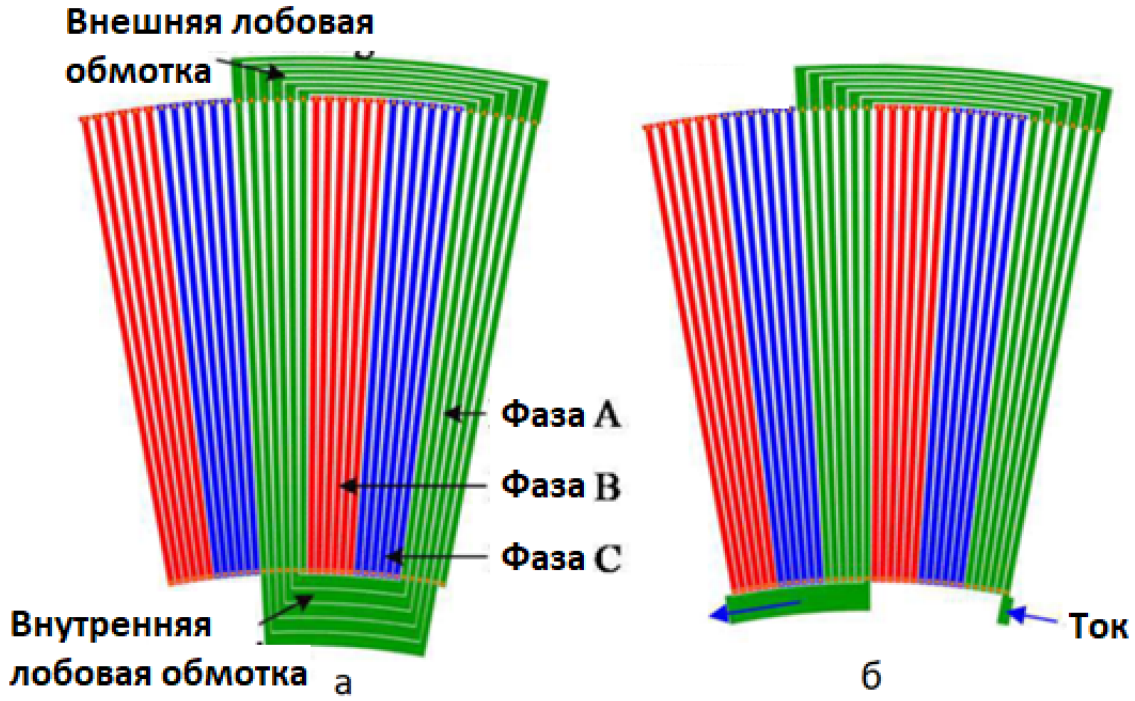



*Рис. 2.* Статор на печатной плате с распределенной волновой обмоткой:
*а* – первый слой модели статора на печатной плате;
*б* – второй слой модели статора на печатной плате

**2. Неперекрывающиеся и перекрывающиеся обмотки фаз**

В неперекрывающихся проводники разных фаз не пересекаются в пространстве слоев *PCB*. Это позволяет получить максимальную собственную индуктивность при минимальной взаимной индуктивности между фазами. Такая конфигурация дает высокий крутящий момент и минимальные пульсации, связанные с межфазным влиянием.

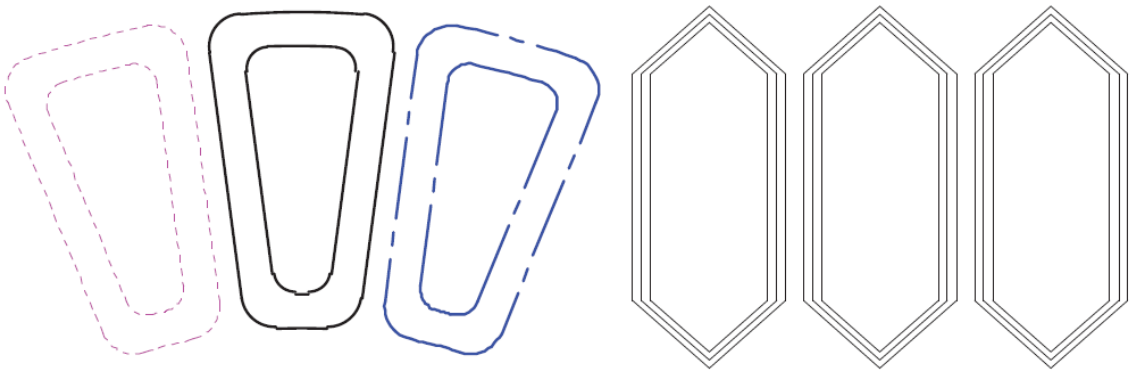


*Рис. 3.* Обмотка с неперекрывающимися фазами

Перекрывающаяся для размещения максимального числа витков проводники фаз на разных слоях пересекаются. Это увеличивает паразитную взаимоиндукцию и усложняет конструкцию, но может использоваться для компактных электрических машин [3].

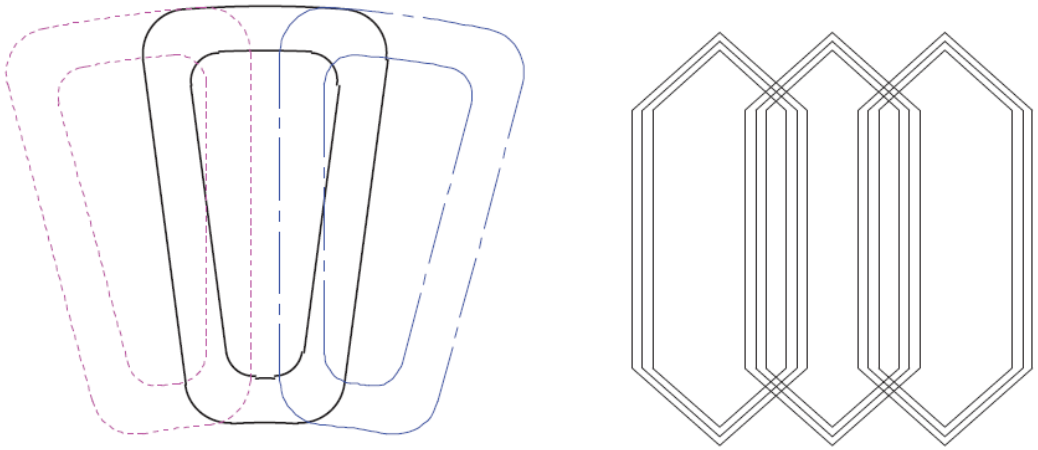


*Рис. 4.* Обмотка с перекрывающиеся фазами

**3. Методы соединений катушек**

Также влияние оказывает схема соединения катушек (межкатушечные перемычки).

Соединение катушек одной фазы может быть выполнено по внешнему или внутреннему диаметру статора.

При использовании перемычки на внутреннем диаметре возникает дисбаланс ампер-витков и, как следствие, не симметрия магнитодвижущей силы фаз. Согласно результатам моделирования [6], перемычка на внешнем диаметре создает малую осевую силу на ротор, в то время как перемычка на внутреннем диаметре приводит к большей силе притяжения ротора. Это не только увеличивает гармонические искажения момента, но и создает постоянную нагрузку на осевые подшипники.

**4. Конструкция статора с сердечником и без сердечника**

В классической конструкции без сердечника, при увеличении числа слоев *PCB* для наращивания ампер-витков, пропорционально растет немагнитный зазор. Это снижает магнитную индукцию в воздушном зазоре.

Ведение ферромагнитных зубцов в специальные пазы статора решает эту проблему. Индукция в зазоре перестает зависеть от толщины *PCB* и имеет высокие значения [2]. Это позволяет увеличить плотность потока, а также увеличить число слоев *PCB* для увеличения мощности.

Но это решение приводит к потерям в стали статора и увеличению пульсаций момента из-за зубцовых гармоник. Также усложняется производство, требующее применения магнито-мягкой стали и более сложной формы печатной платы [2].

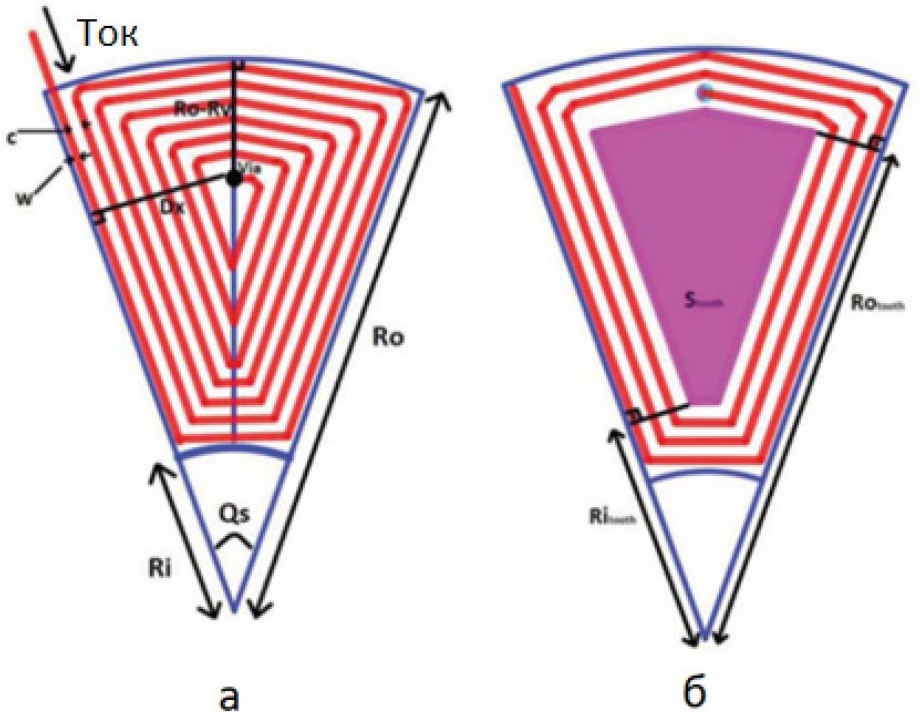



*Рис. 5.* Конструкция статора с сердечником и без сердечника:
*а* – без сердечника; *б* – с сердечником

**Заключение**

Анализ литературы показывает, что для большинства применений при конструировании аксиального двигателя с *PCB* статором лучшим выбором является неперекрывающаяся волновая конструкция с внешними перемычками. Дальнейшее улучшение характеристик возможно путем перехода к пазовой конструкции с ферромагнитными зубцами, если это позволяют требования к пульсациям и тепловыделению.

**Библиографический список**

1. X. Wang, T. Li, P. Gao and X. Zhao, "Design and Loss Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor with PCB Distributed Winding," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1112-1117, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634627.

2. Y. Karabulut and E. Meşe, "Torque Performance Comparison Between Slotted and Non-Slotted Axial Flux PCB Winding Machine," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Gliwice, Poland, 2021, pp. 519-523, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432603.

3. S. Paul, M. Farshadnia, A. Pouramin, J. Fletcher and J. Chang, "Printed Circuit Axial-Flux Permanent Magnet Machines: A Comparative Analysis of Their PCB Topologies and Performance Characteristics," 2018 IEEE International

Magnetics Conference (INTERMAG), Singapore, 2018, pp. 1-1, doi: 10.1109/INTMAG.2018.8508182.

4. R. Knippel, M. Tisler and D. C. Ludois, "Printed Circuit Board Structural Properties and Spiral Groove Trace Conductors for Hydrodynamic Gap Maintenance in Axial Flux Rotating Machines," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 6084-6091, doi: 10.1109/ECCE.2019.8913303.

5. X. Wang, C. Hu, M. Zhao, L. Wu and S. Zhou, "Design of multi-layer PCB coreless axial permanent magnet synchronous motor," 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8921782.

6. C. Li, X. Wang and H. Lv, "Performance Improvement by Pattern Optimization of PCB Winding in Coreless Axial Flux Permanent Magnet Motor," 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510731.

© Бородин Д.С., 2026

УДК 621.3.05

М.Е. БУКРЕЕВ
*maks.bukreev03@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Р.К. ФАТТАХОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К УЧЕТУ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ПРИ РАСЧЕТЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

*Аннотация*. В статье рассматриваются два подхода к моделированию и учету противоаварийной автоматики (ПА) при расчете установившихся режимов электроэнергетических систем – базовый функционал программного комплекса RastrWin3 и авторский макрос, который также применяется в данном комплексе.

*Ключевые слова*: противоаварийная автоматика, расчет режимов, электрическая сеть, автоматизация, RastrWin3, Visual Basic, техническое присоединение, системный оператор.

Современные электроэнергетические системы характеризуются высокой сложностью конфигурации, что обуславливает необходимость учета множества факторов при планировании режимов их работы. Ключевую роль в обеспечении устойчивости энергосистемы при различных возмущениях и авариях играет противоаварийная автоматика. При анализе технических

условий на техническое присоединение новых объектов инженерам требуется выполнять множественные расчеты установившихся режимов.

Одним из основных инструментов для расчета режимов энергосистем является программный комплекс RastrWin3, который имеет достаточно развитый функционал моделирования противоаварийной автоматики (ПА). Однако практический опыт показывает, что значительное время при его использовании через базовый интерфейс занимает настройка и верификация расчетов, особенно при рассмотрении нескольких сценариев.

Цель настоящей работы заключается в сравнении двух способов учета противоаварийной автоматики при расчете режимов. Первым является базовый учет ПА в ПК RastrWin3, а вторым авторское решение в виде встроенного макроса, который использует внешние таблицы для хранения данных. Критериями, которым уделяется особое внимание, являются удобство использования, скорость подготовки расчетов и доступность для инженеров различной квалификации.

Программный комплекс RastrWin3 предоставляет пользователям модуль моделирования противоаварийной автоматики, построенный по трехблочному принципу: пусковые органы, логика и исполнительные механизмы [1]. На рисунке 1 показан алгоритм работы с программным комплексом.

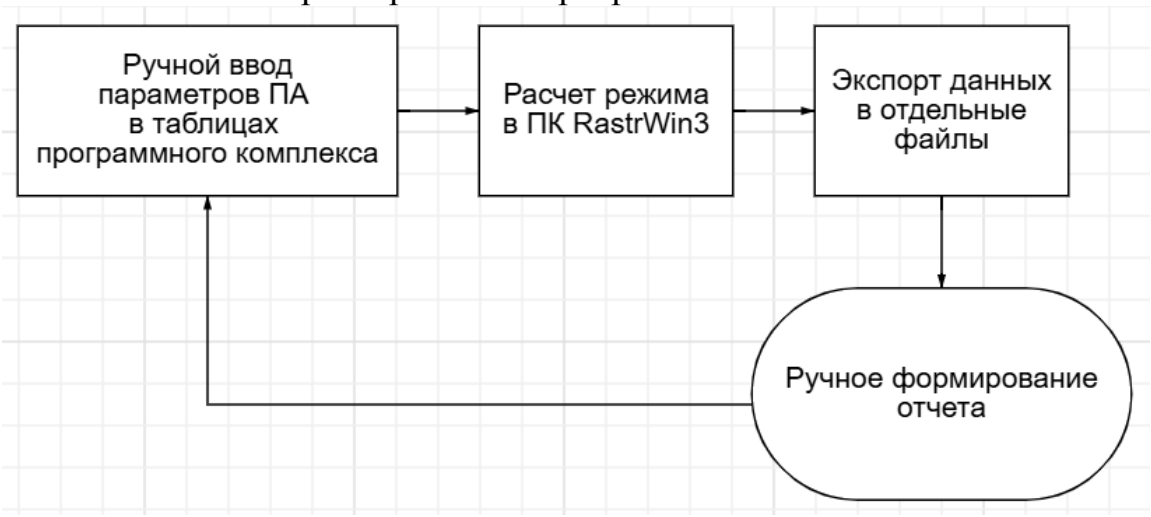



*Рис. 1.* Алгоритм работы с программным комплексом

Мониторинг параметров расчетной схемы и формирование сигналов при достижении заданных уставок осуществляются через пусковой орган, а обработка сигналов через блок логики, воздействие на расчетную модель происходит через исполнительные механизмы.

Несмотря на широкий ряд возможностей, при повседневном использовании выявляются следующие особенности:

1. Программный комплекс требует углубленного знания. Для точной адресации параметров необходима корректная настройка пусковых органов, а ошибка в индексе или названии параметра приведет к некорректному расчету.

2. Параметры ПА настраиваются в специализированных таблицах ПК, а результаты расчета выводятся в отдельных окнах. Формирование итогового отчета требует ручного сбора данных из различных таблиц.

3. При необходимости проанализировать несколько вариантов (например, различные точки присоединения или состав генерации) требуется последовательно изменять исходные данные и перезапускать расчет.

Специализированный макрос, написанный на языке Visual Basic и встроенный непосредственно в программный комплекс RastrWin3, предлагает решение, при котором вычислительное ядро остается неизменным. Макрос позволяет автоматизировать процессы управления расчетами и обработки данных.

Принцип работы макроса заключается в том, что он открывает файл Excel и считывает параметры расчетной схемы, уставки противоаварийной автоматики и перечень режимов для анализа. На основе считанных данных автоматически создается или модифицируется расчетная схема в RastrWin3. Выполняется расчет установившегося режима и проверяются условия срабатывания ПА (например, превышение перетока по сечению, отключение линии), при выполнении условий применяются соответствующие воздействия (изменение состава схемы, ограничение перетоков) и расчет повторяется до стабилизации режима. Результаты (напряжения в узлах, токи и перетоки в ветвях, факты срабатывания ПА) автоматически записываются в таблицу Excel в заранее определенном формате.

К основным преимуществам данного метода можно отнести:

1. Все исходные данные находятся в одном файле, что упрощает их актуализацию.

2. Уставки и условия срабатывания представлены в табличной форме, понятной без изучения функционала RastrWin3.

3. Макрос исключает человеческий фактор и самостоятельно выполняет последовательность расчетов, проверяет условия и формирует отчет.

4. Для использования не требуется глубокое знание функционала ПК, достаточно базовых навыков работы с Excel.

Для объективной оценки обоих подходов был проведен расчет режима фрагмента энергосистемы (около 50 узлов, 70 ветвей) с учетом 10 уставок ПА. Один и тот же специалист выполнял тестирование на идентичных исходных данных. На рисунке 2 показано распределение времени выполнения расчетов.

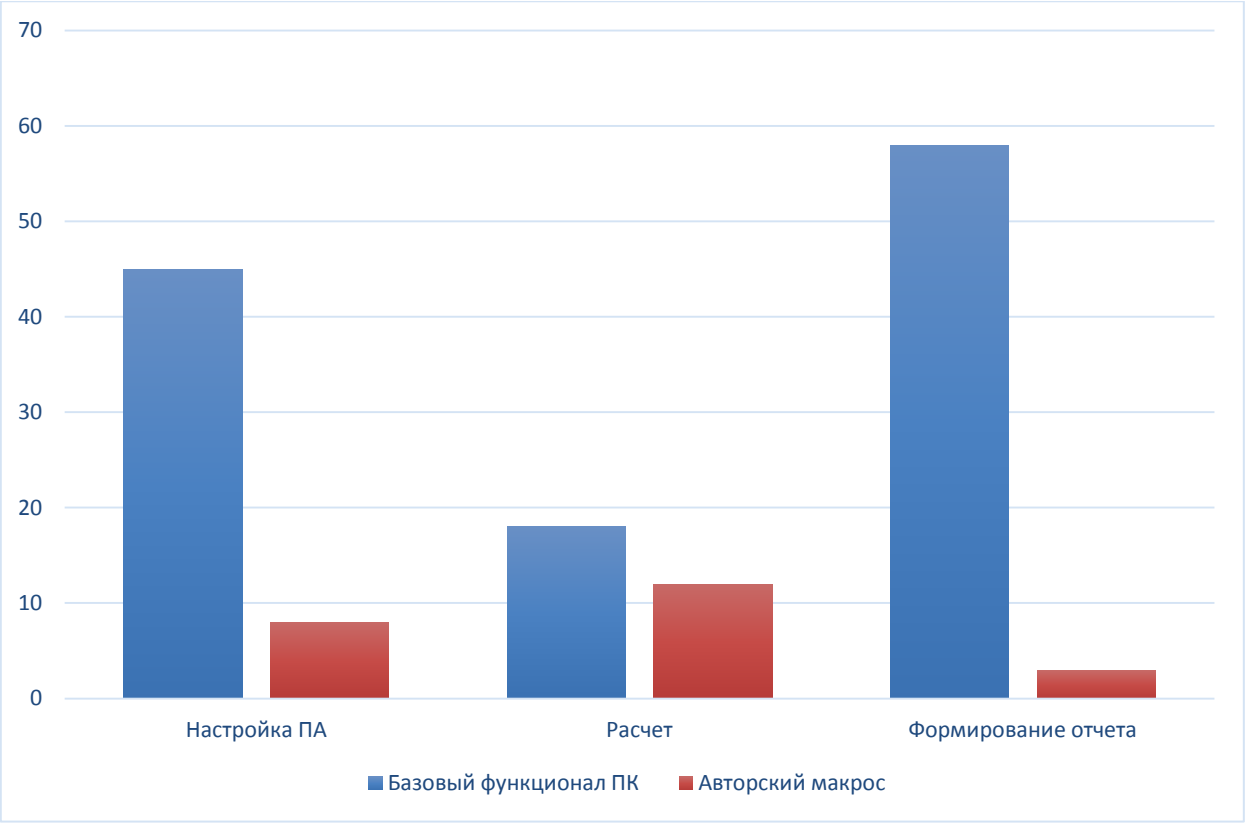



*Рис. 2.* Распределение времени выполнения расчетов

Как видно из приведенных данных, основные временные затраты при работе через базовый функционал приходятся на настройку ПА и формирование отчетности. Использование макроса позволяет перераспределить эти затраты: однократно настроенный шаблон Excel используется многократно, а отчет формируется автоматически.

Автоматизация типовых расчетов при рассмотрении технических условий на техническое присоединение не заменяет штатный функционал ПК RastrWin3, а дополняет его. В условиях ограниченных сроков подготовки заключений, когда необходимо оперативно проанализировать несколько вариантов, это особенно актуально.

Снижение требований к квалификации исполнителя является важным аспектом, потому что для работы специалиста со штатным интерфейсом необходимо глубокое изучение функционала ПК и синтаксиса адресации параметров, но для работы с макросом достаточно базовых навыков работы с Excel и понимания логики ПА.

При этом следует отметить, что макрос требует наличия установленной лицензии ПК RastrWin3 и корректной настройки COM-интерфейса для взаимодействия с Excel.

В заключении можно отметить, что проведенный сравнительный анализ показал, что существенное повышение эффективности работы при учете противоаварийной автоматики достигается при помощи авторского макроса:

1. Время выполнения типовых расчетов сокращается в 2–3 раза за счет автоматизации рутинных операций.

2. При табличном представлении данных упрощается процесс настройки и учета уставок ПА.

3. Глубокое изучение внутренней структуры программного комплекса не требуется, а значит, порог требований для новых сотрудников снижается.

4. Полный контроль логики срабатываний ПА с автоматическим протоколированием осуществляется в отчетной форме.

В практике расчетов режимов разработанный инструмент уже применяется и показывает стабильные результаты.

**Библиографический список**

1. Документация по программному комплексу RastrWin3. – ООО «Растр», 2023. – 98 с.

© Букреев М.Е., 2026

УДК 621.315.1

М.С. ЧИРКОВ
*maks.4upkob@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук М.Б. ГАРЕЕВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ФАЗНЫХ ПРОВОДОВ В КОМПАКТНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ

*Аннотация.* В статье рассматриваются вопросы повышения пропускной способности воздушных линий электропередачи (ЛЭП) за счет перехода к компактному исполнению. Проанализированы две основные геометрии расположения фазных проводов – «треугольник» и «перевернутая ёлка». Построена математическая модель для расчета погонных параметров (индуктивного сопротивления и волнового сопротивления) в зависимости от взаимного расположения фаз.

*Ключевые слова:* компактные ЛЭП, естественная мощность, волновое сопротивление, индуктивное сопротивление, геометрия фаз, треугольник, перевернутая ёлка, математическое моделирование.

**Введение**

Рост потребления электроэнергии и ограниченность территорий для строительства новых линий электропередачи вынуждают искать пути повышения пропускной способности существующих и вновь сооружаемых трасс. Классическим решением является увеличение номинального напряжения или применение устройств продольной компенсации, однако эти способы

требуют значительных капиталовложений. Альтернативный подход – использование компактных ЛЭП, в которых фазы сближены друг с другом и часто имеют нетрадиционное расположение (например, по вершинам треугольника или «перевернутой ёлки») [1, 2].

Основной физический эффект компактных линий – снижение индуктивного сопротивления X0 за счёт уменьшения среднего геометрического расстояния между фазами. Это приводит к уменьшению волнового сопротивления $Z_{\text{в}}=\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ и, как следствие, к увеличению естественной мощности:

$$P_{\text{нат}}=\frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_{\text{в}}},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное линейное напряжение. Повышение $P_{\text{нат}}$ позволяет передавать большую активную мощность без потери статической устойчивости и без генерации реактивной мощности.

Цель данной работы – математически обосновать выбор оптимальной геометрии расположения фазных проводов (треугольник или перевернутая ёлка) для достижения максимальной естественной мощности при соблюдении требований электробезопасности и допустимых уровней электрического поля.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим трёхфазную воздушную линию класса напряжения 110–500 кВ без расщепления фаз (для упрощения на первом этапе). Принимаем, что провода каждой фазы – сталеалюминевые с радиусом $r$ (усреднённо 0,01 м). Длина линии предполагается бесконечно длинной для волновых параметров.

Задача: для двух схем расположения фаз:

- **«Треугольник»** – фазы находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной $D$;
- **«Перевернутая ёлка»** – две нижние фазы расположены симметрично на расстоянии $S$ друг от друга, верхняя фаза – над центром на высоте $H$ от горизонтали нижних фаз.

Необходимо определить зависимости погонных параметров и естественной мощности от геометрических размеров, найти оптимальные соотношения D, S, H при ограничениях: минимальное расстояние между фазами по условию электрической прочности (отсутствие короны) и максимальная напряжённость поля на поверхности провода не выше допустимой.

Сравнение проводим с традиционной горизонтальной линией (фазы на одной траверсе с расстоянием 4–6 м для 110 кВ).

## 2. Математическая модель погонных параметров

Погонные индуктивность $L_0$ и ёмкость $C_0$ трёхфазной линии определяются через матрицы потенциальных коэффициентов и индуктивных

коэффициентов. В силу симметрии (транспозиция фаз) используют средние геометрические расстояния.

**2.1. Для симметричного расположения (равносторонний треугольник)**

Если стороны треугольника $D$ одинаковы, то среднее геометрическое расстояние между фазами:

$$D_{\text{ср}}=D.$$

Эквивалентный радиус фазы (без расщепления) $r_{\text{экв}} = r$.

Тогда погонные параметры:

$$L_0=\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{D}{r},\quad C_0=\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(D/r)}.$$

Волновое сопротивление:

$$Z_{\text{в}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\ln\frac{D}{r}=60\ln\frac{D}{r}\quad(\text{Ом}),$$

где $\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\approx 120\pi$ Ом. Отсюда естественная мощность:

$$P_{\text{нат}}=\frac{U_{\text{ном}}^2}{60\ln(D/r)}.$$

Видно, что уменьшение $D$ ведёт к росту $P_{\text{нат}}$.

**2.2. Для расположения «перевернутая ёлка»**

Введём обозначения: расстояние между нижними фазами $S$, высота верхней фазы относительно горизонтали нижних $H$. Тогда расстояния между фазами:

между нижними фазами ($B$ и $C$): $a_{BC}=S$;

между верхней ($A$) и каждой из нижних: $a_{AB}=a_{AC}=\sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2+H^2}$,

Среднее геометрическое расстояние между фазами:

$$D_{\text{ср}}=\sqrt[3]{a_{AB}a_{AC}a_{BC}}=\left[S\left(\left(\frac{S}{2}\right)^2+H^2\right)\right]^{1/3}.$$

Подставляем в формулу для волнового сопротивления (при условии полной транспозиции):

$$Z_{\text{в}}=60\ln\frac{D_{\text{ср}}}{r}.$$

Естественная мощность:

$$P_{\text{нат}}=\frac{U_{\text{ном}}^2}{60\ln\left(\dfrac{\left[S\left((S/2)^2+H^2\right)\right]^{1/3}}{r}\right)}$$

Оптимизация сводится к минимизации $D_{\text{ср}}$ при заданных ограничениях по электрической прочности: минимальное расстояние между любыми двумя проводами должно быть не менее $D_{\text{мин}}$, которое для воздушных линий 110 кВ составляет около 1,2–1,5 м (с учётом короны и импульсных перенапряжений).

### 3. Численное моделирование и результаты

Проведём расчёт для номинального напряжения 110 кВ (максимальное рабочее 126 кВ). Радиус провода примем $r$=0,01 м. Ограничение минимального расстояния $D_{мин}$=1,2 м.

### 3.1. Геометрия «треугольник»

Сторона треугольника $D$ может изменяться от 1,2 м до 4 м (далее выходим за рамки компактности). Рассчитаем $Z_в$ и $P_{нат}$ по формулам выше. Результаты сведены в табл. 1.

*Таблица 1*

Зависимость параметров от $D$ (треугольник)

| $D$, м | ln($D$/$r$) | $Z$_в, Ом | $P$_нат, МВт (при $U$=110 кВ) |
|---|---|---|---|
| 1,2 | 4,787 | 287,2 | 42,1 |
| 1,5 | 5,011 | 300,7 | 40,2 |
| 2,0 | 5,298 | 317,9 | 38,0 |
| 3,0 | 5,703 | 342,2 | 35,3 |
| 4,0 | 5,991 | 359,5 | 33,6 |

Для сравнения: традиционная горизонтальная линия 110 кВ с расстоянием между фазами 4 м даёт $D_{ср}\approx\sqrt[3]{4\cdot4\cdot8}\approx5{,}04$ м.(транспонированная),

$$Z_в=60\ln\left(\frac{D}{r}\right)=60\ln\left(\frac{5{,}04}{0{,}01}\right)=60\ln(504)\approx60\cdot6{,}22=373\text{ Ом},\ P_{нат}\approx32{,}4\text{ МВт}.$$

Вывод: при треугольнике со стороной 1,2 м естественная мощность возрастает на **30%** (с 32,4 до 42,1 МВт). Однако при таком сближении необходимо проверять напряжённость электрического поля.

### 3.2. Геометрия «перевернутая ёлка»

Зафиксируем минимальное расстояние между фазами $D_{мин}$=1,2 м. Для схемы «ёлка» критическими являются расстояния между верхней и нижними фазами (они обычно меньше, чем между нижними). Пусть $a_{AC}=a_{AB}$=1,2 м. Тогда $H=\sqrt{1{,}2^2-\left(\frac{S}{2}\right)^2}$. При этом $S$ может быть больше или меньше 1,2 м. Чтобы снизить $D_{ср}$, нужно увеличивать $H$ (поднимать верхнюю фазу) и одновременно

разносить нижние фазы? Но увеличение $S$ при фиксированных $a_{AB}$ уменьшает $H$. Найдём оптимум.

Рассмотрим функцию $D_{ср}(S)=\left[S\left(\left(\frac{S}{2}\right)^2+H(S)^2\right)\right]^{1/3}$, где $H=\sqrt{1{,}2^2-\left(\frac{S}{2}\right)^2}$, при условии $S\leq 2{,}4 S\leq 2{,}4$ м (чтобы подкоренное выражение было неотрицательным). Результаты расчёта:

*Таблица 2*

Параметры «перевернутой ёлки» при фиксированной АВ=1,2 м*

| $S$, м | $H$, м | $D$_ср, м | ln($D$_ср/ $r$) | $Z$_в, Ом | $P$_нат, МВт |
|---|---|---|---|---|---|
| 1,2 | 1,039 | 1,200 | 4,787 | 287,2 | 42,1 |
| 1,5 | 0,933 | 1,216 | 4,800 | 288,0 | 42,0 |
| 1,8 | 0,795 | 1,249 | 4,828 | 289,7 | 41,7 |
| 2,0 | 0,663 | 1,280 | 4,852 | 291,1 | 41,5 |
| 2,2 | 0,478 | 1,312 | 4,877 | 292,6 | 41,3 |
| 2,4 | 0 | 1,341 | 4,899 | 293,9 | 41,1 |

Видно, что минимальный $D_{ср}$ достигается при наименьшем $S$ (1,2 м), то есть когда все три фазы расположены в вершинах равностороннего треугольника с $S$=1,2 м и $H$=1,039 м. Это тот же треугольник, но повёрнутый. Если же мы хотим использовать преимущество «ёлки» – уменьшить высоту опоры или ширину коридора – нужно искать другой критерий.

В реальных компактных ЛЭП схему «перевернутая ёлка» применяют не для минимизации $D_{ср}$ любой ценой, а для снижения высоты опоры при сохранении приемлемого $D_{ср}$. Например, увеличивают $S$ до 3–4 м, тогда $H$ становится отрицательным (верхняя фаза ниже горизонтали нижних) – это уже не «перевернутая», а обычная «ёлка». Но для компактности часто используют вариант с малым $S$ и большим $H$, что даёт треугольную конфигурацию.

### 4. Сравнение и выбор оптимальной геометрии

С точки зрения чисто электрических характеристик (максимум $P_{нат}$) наилучшим является равносторонний треугольник с минимально допустимым расстоянием между фазами. Однако у такого решения есть недостатки:

1. Сложность подвески трёх фаз на одной опоре (требуются специальные траверсы или изоляторы на сжатие).

2. Увеличение напряжённости электрического поля на проводах, что может вызвать корону.

3. Сложность обслуживания.

4. Схема «перевернутая ёлка» даёт почти такую же $P_{нат}$ при $S$ порядка 1,5–2 м (см. табл. 2, снижение мощности менее 2%), но позволяет:

5. Использовать более низкие опоры (верхняя фаза незначительно выше нижних).

6. Упростить монтаж (две фазы на одной траверсе).

7. Уменьшить ширину коридора (при $S$=1,5 м ширина коридора по фазе ~ 1,5 м против 3–4 м у горизонтальной линии).

Оптимальные соотношения для класса 110 кВ:

1. Треугольник: $D$=(1,2…1,5)·$D_{мин}$ – обеспечивает максимум мощности, но требует жёсткой фиксации фаз распорками.

2. Перевернутая ёлка: $S$≈(1,2…1,8)·$D_{мин}$, $H$≈(0,8…1,0) –даёт компромисс между мощностью и конструктивной простотой.

Для более высоких классов напряжения (220–500 кВ) выигрыш становится ещё заметнее из-за большего влияния индуктивного сопротивления на пределы передачи.

**5. Практические рекомендации и перспективы**

На основе проведённого моделирования можно рекомендовать:

1. При проектировании новых компактных линий 110 кВ в густонаселённой местности предпочтение отдавать схеме «перевернутая ёлка» с расстояниями между фазами 1,5–2 м, что позволяет сократить ширину просеки с 25–30 м до 15–18 м.

2. Для повышения естественной мощности дополнительно применять расщепление фаз (2–3 провода в фазе), что снижает rэкв$r$экв и ещё больше уменьшает $Z_в$. Совместный эффект компактности и расщепления может дать увеличение $P_{нат}$ в 1,5–1,8 раза.

3. Обязательно проводить проверку на корону: при сближении фаз напряжённость на поверхности провода возрастает. Для 110 кВ при $D$=1,2$D$=1,2 м напряжённость достигает 18–20 кВ/см, что близко к критическому значению (21 кВ/см для гладкого провода). Поэтому необходимо использовать провода с увеличенным радиусом или покрытием.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на учёт несимметрии фаз, моделирование переходных процессов (грозовые перенапряжения) и экономическое обоснование.

**Заключение**

В работе выполнена оптимизация расположения фазных проводов компактных ЛЭП с целью повышения естественной мощности. Установлено, что:

1. Переход от традиционной горизонтальной линии к компактной с геометрией «равносторонний треугольник» позволяет увеличить $P_{нат}$ на 30% при сохранении класса напряжения.

2. Схема «перевернутая ёлка» при оптимальных параметрах ($S \approx 1{,}2D_{мин}$, $H \approx 0{,}9D_{мин}$) даёт практически такой же выигрыш (28–29%), но при этом снижает высоту опоры и упрощает конструкцию.

3. Для практической реализации рекомендовано использовать геометрию «перевернутая ёлка» как наиболее сбалансированную по критериям «мощность – стоимость – надёжность».

Результаты могут быть использованы при проектировании новых и реконструкции существующих линий электропередачи в условиях стеснённой городской застройки и на экологически чувствительных территориях.

## Библиографический список

1. Веников В.А. Дальние электропередачи переменного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.

2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

3. Рыжов Ю.П. Компактные линии электропередачи // Электричество. – 2005. – № 7. – С. 12–18.

4. Копылов И.П., Соколов В.А. Математическое моделирование параметров воздушных линий. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 156 с.

5. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2020.

© Чирков М.С., 2026

УДК 621.313.13:629.33
В.К. ЧОРБА
*Ghjklk228@gmail.com*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент О.А. ЮШКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ГЕНЕРАТОРА ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ БОРТОВОЙ СЕТИ АВТОМОБИЛЯ

*Аннотация*. В работе рассмотрены основные требования к генераторам повышенной мощности для современных автомобилей, проанализированы конструктивные особенности и электрические схемы. Выявлены основные факторы, ограничивающие рост мощности, и предложены методы улучшения охлаждения, повышения КПД и надежности. Приведены рекомендации по выбору элементной базы и режимам эксплуатации.
*Ключевые слова*: автомобильный генератор; повышенная мощность; обмотка статора; выпрямитель; охлаждение; надежность; бортовая сеть.

Современное автомобильное электрооборудование характеризуется неуклонным ростом потребляемой мощности. Дополнительные потребители – мощные аудиосистемы, дополнительные фары, лебедки, подогреватели, системы климат-контроля и вспомогательные преобразователи – требуют от бортового генератора выходной мощности, значительно превышающей штатную (обычно 1–3 кВт). Разработка генератора повышенной мощностью (до 5–7 кВт и выше) сопряжена с рядом технических противоречий: между габаритами, массой, отбором мощности от двигателя и тепловым режимом. Поэтому проектирование таких генераторов требует комплексного подхода.

Основным конструктивным отличием генератора повышенной мощности является увеличенное сечение обмоточного провода статора, а также использование более мощных выпрямительных диодов на радиаторах. Ток статора в мощном генераторе может достигать 200–300 А, что предъявляет повышенные требования к контактным соединениям, пайке и надежности изоляции. При этом сохраняется стандартный посадочный размер под кронштейн двигателя, что вынуждает разработчиков искать резервы повышения мощности без изменения габаритов.

Основной проблемой становится отвод тепла. Потери в генераторе растут пропорционально квадрату тока, и при выходной мощности 5 кВт потери могут составлять 800–1000 Вт. Стандартного вентилятора на роторе зачастую недостаточно, поэтому в генераторах повышенной мощности применяются:

- двухвентиляторные системы охлаждения;
- масляное охлаждение обмоток;
- внешний принудительный обдув;
- использование обмоток с улучшенной теплопроводной изоляцией.

Особое внимание следует уделить выпрямительному блоку. Стандартные диоды в корпусе DO-203 (прессовые) при токах более 100 А работают на пределе. Более перспективны сборки на диодах Шоттки и сдвоенные модули с улучшенным теплоотводом. Также возможно применение активного выпрямления на полевых транзисторах (синхронный выпрямитель), что снижает прямые потери в 2–3 раза.

Важным фактором является стабильность выходного напряжения. Генераторы повышенной мощности оснащаются цифровыми регуляторами напряжения с программной характеристикой, позволяющими адаптировать выходное напряжение под режим работы (например, повышенное напряжение зимой для компенсации падения емкости аккумулятора). Также такие регуляторы реализуют защиту от перегрузки и перегрева.

Методы контроля состояния генератора повышенной мощности включают:

- встроенные датчики температуры обмоток и выпрямительных диодов;
- измерение тока нагрузки с передачей по CAN-шине;
- диагностику износа щеток и контактных колец;
- тепловизионную диагностику при профилактических осмотрах.

Экспериментальные исследования показывают, что при переходе с 2,5 кВт на 5 кВт при неизменном наружном диаметре статора (128 мм) температура обмоток при длительной работе возрастает с 105 °С до 135 °С, что требует перехода с класса изоляции F (155 °С) на класс H (180 °С). При этом ресурс генератора снижается не более чем на 20% при соблюдении теплового режима.

Рекомендуемые конструктивные решения:

- зубцовая зона статора с увеличенным пазом (коэффициент заполнения медью до 0,45);
- обмотка с прямоугольным проводом для лучшего теплоконтакта;
- ротор на постоянных магнитах (неодим-железо-бор) для уменьшения тока возбуждения;
- принудительное жидкостное охлаждение статора в особо мощных исполнениях (свыше 6 кВт).

Таким образом, создание генератора повышенной мощности для автомобиля технически осуществимо при условии оптимизации системы охлаждения, применения современных материалов и интеллектуального управления. Наиболее перспективным является комбинированный подход, объединяющий улучшенную вентиляцию, синхронное выпрямление и цифровую систему защиты. Дальнейшие исследования могут быть направлены на внедрение бесщеточных генераторов и интеграцию с тяговыми электродвигателями гибридных автомобилей.

## Библиографический список

1. Копылов И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. – Москва: Высшая школа, 2010.

2. Вольдек А. И. Электрические машины : учебник для вузов / А. И. Вольдек. – Санкт-Петербург : Питер, 2012.
3. Зозулин Ю. В. Автомобильные генераторы : устройство, эксплуатация, ремонт / Ю. В. Зозулин. – Москва : Транспорт, 2015.
4. Иванов А. И. Надёжность и диагностика электрических машин / А. И. Иванов. – Москва : Энергоиздат, 2015.
5. ГОСТ 183–74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2008.
6. ГОСТ IEC 60034-1–2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные данные и характеристики. – Москва : Стандартинформ, 2015.

© Чорба В.К. 2026

УДК 621.313.3

И.Э. ЕНИКЕЕВ
*Ildar.enikeev00@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Т.Р. ТЕРЕГУЛОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ОТКАЗ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В ПОЛЕТЕ ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЕТА

*Аннотация.* В статье рассматривается архитектура, принципы управления и логика резервирования основных источников электропитания гражданского воздушного судна. Подробно анализируется иерархия энергетических систем: двигательные генераторы (IDG/VFG), вспомогательная силовая установка (ВСУ), аварийная турбина (RAT) и аккумуляторные батареи. Подробно рассмотрены типовые сценарии отказов, а также показана как выглядит панель управления электричеством на борту самолета.

*Ключевые слова:* воздушный генератор, аварийный генератор, режим работы, интегрированный привод генератор, вспомогательная силовая установка, мультипликатор, отказоустойчивость.

В современном мире авиация развивается большими шагами, гражданские самолеты представляют собой сложные технические комплексы, которые способны работать в тяжелых условиях. Летать на самолете уже давно не представляет собой роскоши, а наоборот, это является необходимостью. В связи с этим требуются повышение безопасности полета, в том числе исследования отказов источников питания бортовой электрической сети самолета.

В большинстве гражданских самолетов существуют два независимых друг от друга канала генерирования переменного тока – это правый борт и левый борт самолета. На каждом из бортов расположены 2 основных

генератора, которые питают практически все потребители воздушного судна, так же генератор вспомогательной силовой установки (ВСУ) – обеспечивающий запуск двигателей самолета на земле. При отказе всех основных генераторов на борту имеются аварийный генератор, который выпускается в передней части самолета.

Рассмотрим иерархию источников питания приведенную в таблице 1. Бортовая сеть строится по принципу многоуровневого резервирования. Каждый источник имеет чёткое место в приоритетной цепочке.

*Таблица 1*

| **Источник** | **Мощность** | **Когда используется** | **Ограничения** |
|---|---|---|---|
| Двигательные генераторы (основные) | 60–150 кВА | Основной режим в полете и на земле, после запуска двигателей | Зависят от работы двигателя, не работают при остановке двигателя |
| Генератор ВСУ | 60–120 кВА | Земные операции, запуск двигателей, резерв в полете | Ограничение по высоте или температуре, расход топлива, ресурс |
| Аварийный генератор | 5–15 кВА | Полная потеря основных источников в полете | Раскрывается только в потоке (>100-140 узлов), ограниченная мощность |
| Аккумуляторные батареи | 10–40 кВт*ч 24 В постоянного тока | Мостовое питание при переключениях, запуск ВСУ, резерв для критических систем, аварийное освещение | Ограниченное время работы (30-60 мин), чувствительность к температуре и перезаряду |
| Внешнее питание | До 150 кВА | Только на земле, до запуска двигателей | Автоматически выключается при появлении бортового источника |

Рассмотрим управление источниками автоматизировано через логики подключения и управления. Простая модель:

1. Если доступен двигательный генератор → он питает свою шину.
2. При его отказе → автоматически замыкается шинный разъединитель (BTB), нагрузку берёт исправный генератор.
3. Если оба двигателя не генерируют → система пытается запустить ВСУ.
4. Если ВСУ недоступен или высота выше потолка работы → раскрывается RAT.
5. На всех этапах перехода АКБ и статические инверторы поддерживают питание Essential/Standby шин.

**Автоматический сброс нагрузки (Load Shedding).** При деградации сети система последовательно отключает потребителей по приоритетам:

Tier 1 (немедленно): галеры, IFE, розетки пассажиров, подсветка салона, вспомогательные насосы.

Tier 2 (при дальнейшем падении): кондиционирование. противообледенение крыла (частично), не критичная авионика.

Essential Bus: всегда остаётся под питанием (полётные компьютеры, индикаторы, связь, навигация, управление РЦ) (таблица 2).

*Таблица 2*

| **Типовые сценарии отказов и реакция системы** | | | |
|---|---|---|---|
| Сценарий | Реакция автоматики | Что видит экипаж | Время восстановления |
| Отказ 1 генератора | BTB замыкается, нагрузка делится. Возможен мягкий сброс галер. | ECAM/EICAS: GEN 1 OFF, BUS TIE CLOSED. | Мгновенно |
| Отказ 2 генераторов + ВСУ доступен | Автозапуск ВСУ, питание через APU GEN. | APU GEN ON, восстановление шин. | 30 – 90 сек |
| Полная потеря AC (Dual Engine + APU fail) | Раскрытие RAT → питание EMER GEN. АКБ мостит переход. Статический инвертор формирует AC для критических систем. | RAT DEPLOYED, DC ESS ONLY, INVERTER ON. | 5–10 сек до стабилизации |
| КЗ на шине | GCU/SSPC мгновенно отключает повреждённый участок. Здоровые шины изолированы. | ELEC BUS FAULT, ручное или автопереключение на альтернативную конфигурацию. | Мгновенно (защита <50 мс) |
| Потеря обоих АКБ | Критичный сценарий. Возможна потеря записей полёта, аварийного освещения, части навигации. Нормы запрещают такой отказ в полёте (вероятность $<10^{-9}$). | BAT OFF, предупреждения о потере резерва. | Требуется немедленная посадка |

Пояснение к иностранным терминам:

BTB – Bus Tie Breaker/ Bus Tie Contactor – Шинный соединительный контактор. Замыкает/размыкает связь между двумя шинами (например, AC BUS 1 и AC BUS 2) для перераспределения нагрузки или изоляции неисправности.

ECAM – Electronic Centralized Aircraft Monitor – Система индикации и предупреждений на Airbus. Отображает статус электросистемы, процедуры при отказах.

EICAS – Engine Indicating and Crew Alerting System – Аналог ECAM на Boeing и других производителях.

APU – Auxiliary Power Unit – Вспомогательная силовая установка (ВСУ). Малый газотурбинный двигатель в хвосте ВС для выработки электричества и воздуха на земле/в полёте.

RAT – Ram Air Turbine – Аварийная турбина, выдвигаемая в набегающий поток. Приводит в действие аварийный генератор и/или гидронасос при полной потере основных источников.

GPU – Ground Power Unit – Наземный источник питания. Подключается к ВС на стоянке для питания систем без запуска двигателей/ВСУ.

IDG – Integrated Drive Generator – Встроенный генератор с приводом постоянной скорости (CSD + генератор). Выдаёт стабильные 115 В / 400 Гц независимо от оборотов двигателя.

VFG – Variable Frequency Generator – Генератор переменной частоты. Работает напрямую от вала двигателя, частота меняется в диапазоне ~360–800 Гц. Легче и надёжнее IDG.

На рисунках 1 и 2 приведено расположение панели управления электричеством в гражданском самолете Boeing 737.



*Рис. 1*. Кабина Boeing 737




*Рис. 2*. Панель управления электричеством

Вертикальная черта отделяет управление постоянным напряжением от переменного.

Вверху дисплей, на нем отображается информация, которую мы хотим видеть с помощью поворота ручек ниже:

- DC AMPS – амперметр постоянного тока;
- DC VOLTS – вольтметр постоянного тока;
- CPS FREQ – частота переменного тока;
- AC AMPS – амперметр переменного тока;
- AC VOLTS – вольтметр переменного тока.

Далее 3 табло они горят в следующих случаях:

- BAT DISCHARGE – батарея разряжается;
- TR UNIT – вышел из строя один из преобразователей;
- ELEC – неисправность в сети постоянного тока;
- Кнопка MAINT нужна для обслуживания и работает только когда оба селектора находится в режиме тест.

Ниже видим селектор режимов, эти ручки ничего не переключают и ничего не отключают, они просто выбирают какую информацию отображает дисплей. Правая для постоянного тока, левая для переменного.

- STBY PWR – снимаются показания вольтажа и ампер с резервного питания;
- BAT BUS – параметры шины батареи;
- BAT – параметры батареи;
- AUX BAT – параметры дополнительного аккумулятора;

– TR 1, TR 2, TR 3 – параметры преобразователя преобразователь (выпрямитель + понижающий трансформатор);

– TEST – только для обслуживания.

Перейдем к селектору переменного тока;

– STBY PWR – снимает показания с линии резервного питания;
– GRD PWR – показания наземного питания;
– GEN 1 – показания генератора, вращаемого левым двигателем;
– APU GEN – генератор ВСУ;
– GEN 2 – показания генератора, вращаемого правым двигателем;
– INV – показания на выходе инвертора.

Следующий тумблер BAT подключает и отключает батарею. В полете отключать запрещено, поэтому, когда колпачок закрыт, тумблер переведется в положение ON.

Последние 2 тумблера

– CAB/UTIL – подключает или отключает различное оборудование в кабине и на кухне. Например, для подогрева еды и воды;

– IFE/PASS SEAT – подключает или отключает различное оборудования на местах пассажиров, а также развлекательные системы.

В мире отказы во время полета случаются редко, но если и случаются, то автоматика и экипаж делают все чтобы спасти пассажиров и безопасно приземлиться.

Рассмотрим реальную историю отказа системы генерирования. 15 января 2009 года авиалайнер Airbus A320-214 авиакомпании US Airways выполнял рейс AWE 1549 по маршруту Нью-Йорк — Шарлотт – Сиэтл. Через 1,5 минуты после взлёта самолёт столкнулся со стаей канадских казарок, и у него отказали оба двигателя. Оба двигателя заглохли → ВСУ не успел выйти на режим → автоматически раскрылся RAT → обеспечил питание гидравлики и базовой авионики. АКБ поддерживали запись данных и связь до момента касания воды. Экипаж принял решение посадить самолёт на воду реки Гудзон в Нью-Йорке. Пилотам удалось развернуть лайнер, взлетавший на север, на юг, спланировать над рекой, не задев мост Джорджа Вашингтона, и приводнить самолёт напротив 48-й улицы Манхэттена. Все пассажиры выжили и получили несерьезные травмы.

Таким образом, гражданская авиация не стоит на месте, развитие авиационных генераторных систем будет продолжать идти по пути повышения безопасности полета, эффективности и интеллектуализации управления, что соответствует общемировым тенденциям в области авиационной электротехники.

## Библиографический список

1. ГОСТ Р 54812-2011. Системы электроснабжения воздушных судов. Общие технические требования. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 24 с.

2. Смирнов А.В., Козлов И.П. Авиационные электрические системы: учебное пособие. – М.: МАИ, 2020.

3. Петров С.С. Перспективы развития генераторных установок для гражданской авиации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 78-85.

4. Минобрнауки (2025) *Система электроснабжения самолета SJ-100 (SSJ-NEW)* (https://minobrnauki.gov.ru/colleges_councils/kollegialnyeorgany/prize_science/public_science/files2024/P24-15.pdf)

5. Boeing 787 Electrical Power System Description. – Seattle: Boeing Commercial Airplanes, 2022. – 156 p.

6. Airbus A350 XWB Electrical Generation System. Technical Manual. – Toulouse: Airbus SAS, 2023. – 89 p.

7. Johnson D., Miller R. More Electric Aircraft: Power Generation Challenges and Solutions // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2024. – Vol. 10, № 2. – P. 145-162.

8. SAE International, ARP4761, "Guidelines for Conducting Safety Assessment", 1996.

9. Moir I., Seabridge A., "Aircraft Systems", 3rd ed., Wiley, 2008

© Еникеев И.Э., 2026

УДК 620.1.08

Р.А. ФЕДОРОВ
*uust-FedorovR@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент. Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

## КОЭФФИЦИЕНТ С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

*Аннотация*. В работе рассмотрен подход к выявлению витковых замыканий в трансформаторе, основанный на периодическом измерении параметров на холостом ходу. Описан коэффициент, который в ходе развития виткового замыкания возрастает быстрее, чем ток обратной последовательности, который предлагается для тех же целей в научной литературе. Оценена чувствительность коэффициента к витковым замыканиям по сравнению с током обратной последовательности.

*Ключевые слова*: трансформатор, витковое замыкание, обмотка, холостой ход.

## Введение

Витковые замыкания образуются в силовых трансформаторах в результате износа или старения межвитковой изоляции в обмотках. На ранних стадиях развития такие замыкания затрагивают только два витка, между которыми образовалось повреждение изоляции, поэтому их раннее обнаружение затруднительно из-за малого влияния на параметры катушки. С течением времени замыкание способно охватывать новые витки, поскольку токи, протекающие через поврежденную изоляцию, могут нагревать близкорасположенную неповрежденную изоляцию, ухудшая её свойства.

Витковые замыкания возникают в трансформаторах чаще, чем многие другие виды повреждений [1,2]. При этом витковые замыкания, не обнаруженные на ранних стадиях их развития, могут серьезно влиять на параметры трансформатора и способны перерастать в короткие замыкания. На поздних этапах витковое замыкание будет отключено релейной защитой трансформатора, но при таком сильном повреждении катушки трансформатор будет неспособен поддерживать номинальный коэффициент трансформации и потребует ремонта. Поэтому сильный интерес представляют способы выявления витковых замыканий на ранних стадиях их развития: при слабых витковых замыканиях трансформатор может исправно работать, поэтому раннее обнаружение повреждения позволит запланировать ремонт и избежать потерь, связанных с неожиданным выходом из строя трансформатора и его срочным ремонтом или заменой.

В работе изучается метод выявления витковых замыканий на ранних стадиях их развития при помощи измерения параметров на холостом ходу. Известно, что для исправного трансформатора параметры холостого хода, такие, как ток на вводах или напряжение на вторичных обмотках, будут неизменными при неизменных параметрах сети. Периодический вывод трансформатора на холостой ход и измерение его параметров дают возможность обнаруживать малозаметные повреждения, поскольку внезапное отклонение от ожидаемых значений указывает на изменения во внутренней цепи трансформатора.

Измерение производится на холостом ходу, чтобы исключить погрешность, вызванную непостоянством нагрузки в нормальном режиме работы трансформатора. При этом чувствительность метода зависит от того, какой именно параметр измеряется на холостом ходу. В научной литературе предлагаются такие варианты, как измерение суммы фазных токов [3], тока обратной последовательности [4], а также напряжения в трансформаторе [5]. В работе предлагается использовать разработанный коэффициент.

## Предложенный коэффициент для выявления витковых замыканий на холостом ходу и способ его расчёта

Разработан коэффициент, который подходит для выявления изменений во внутренней цепи трансформатора, поскольку возрастает при несимметрии фазных токов. Несимметрия фазных токов характерна для витковых замыканий,

так как затрагивает только одну из фазных обмоток. Разработанный коэффициент может быть рассчитан по формуле:

$$F = \left|\overline{I_{\text{разн}}}\right| \cdot |\overline{I_2}|,$$

где $\left|\overline{I_{\text{разн}}}\right|$ – модуль разности высшего и низшего из значений измеренных фазных токов на вводах трансформатора, А;

$|\overline{I_2}|$ – модуль тока обратной последовательности, А.

Модуль тока обратной последовательности может быть рассчитан согласно [4]. Ниже представлен способ пошагового расчета модуля тока обратной последовательности из известных значений фазных токов на вводах трансформатора.

В рамках расчета угол тока фазы *A* принять равным 0. Угол тока фазы *C* определить по формуле:

$$\varphi_c = 180° - acos\left(\frac{I_a^2 - I_b^2 + I_c^2}{2 \cdot I_a \cdot I_c}\right),$$

где $I_a$, $I_b$, $I_c$ – токи фаз *A*, *B* и *C*, измеренные на вводах трансформатора, выведенного на холостой ход.

Угол тока фазы *B* определить по формуле:

$$\varphi_b = 180° + asin\left(\frac{I_c \cdot sin(\varphi_c)}{I_b}\right).$$

Комплексное значение тока фазы *A* принять полностью действительным без мнимой составляющей, поскольку приняли угол тока фазы *A* равным нулю:

$$\overline{I_a} = I_a + j \cdot 0.$$

Рассчитать комплексное значение тока фазы *B*:

$$\overline{I_b} = I_b \cdot \cos(\varphi_b) + j \cdot I_b \cdot \sin(\varphi_b).$$

Рассчитать комплексное значение тока фазы *C*:

$$\overline{I_c} = I_c \cdot \cos(\varphi_c) + j \cdot I_c \cdot \sin(\varphi_c).$$

Составляющую тока обратной последовательности, соответствующую фазе *A*, принять равной току фазы *A*:

$$\overline{I_{\text{обр.}A}} = I_a + j \cdot 0.$$

Составляющую тока обратной последовательности, соответствующую фазе *B*, рассчитать по формуле:

$$\overline{I_{\text{обр.}B}} = I_b \cdot \cos\left(\varphi_b + 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + j \cdot I_b \cdot \sin\left(\varphi_b + 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}\right).$$

Составляющую тока обратной последовательности, соответствующую фазе *C*, рассчитать по формуле:

$$\overline{I_{\text{обр.}C}} = I_c \cdot \cos\left(\varphi_c + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + j \cdot I_c \cdot \cos(\varphi_c + \frac{2 \cdot \pi}{3}).$$

Величину тока обратной последовательности найти с использованием трех ранее рассчитанных составляющих:

$$\overline{I_2} = \frac{\overline{I_{\text{обр.}A}} + \overline{I_{\text{обр.}B}} + \overline{I_{\text{обр.}C}}}{3}.$$

Модуль тока обратной последовательности найти при помощи формулы модуля комплексного числа:

$$I_2 = |\bar{I}_2| = \sqrt{I^2_{2(\text{действ.})} + I^2_{2(\text{мним.})}},$$

где $I_{2(\text{действ.})}$ – действительная составляющая комплексного числа;

$I_{2(\text{мним.})}$ – мнимая составляющая комплексного числа.

Далее из известного тока обратной последовательности можно рассчитать разработанный коэффициент:

$$F = (|\overline{I_{\Ф.\text{макс}}}| - |\overline{I_{\Ф.\text{мин}}}|) \cdot I_2$$

где $|\overline{I_{\Ф.\text{макс}}}|$ – наибольший из трех модулей фазных токов, измеренных на вводах трансформатора, А;

$|\overline{I_{\Ф.\text{мин}}}|$ – наименьший из трех модулей фазных токов, измеренных на вводах трансформатора, А.

## Анализ перспективности разработанного коэффициента для практического использования

В качестве критерия для анализа перспективности выбрана чувствительность разработанного коэффициента к витковым замыканиям на холостом ходу. Для оценки чувствительности произведено сравнение значений, принимаемых коэффициентом в процессе развития виткового замыкания с значениями, которые принимает другая величина, ранее предложенная для этого метода в научной литературе. Для сравнения выбран ток обратной последовательности, поскольку при анализе актуальной научной литературы именно этот параметр выявлен как один из самых чувствительных для исследуемого метода выявления витковых замыканий среди предложенных [4].

Для математического моделирования виткового замыкания использованы значения токов на холостом ходу на вводах исправного и поврежденного трансформатора. Эти значения аналогичны значениям, приведенным в статье [4] и обозначены как точка А и точка Г соответственно. Дополнительно приняты значения токов на промежуточных стадиях развития виткового замыкания (точки Б и В). Единицы измерения токов были условно опущены при оценке чувствительности. Принятые значения фазных токов приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

Значения измеренных фазных токов на разных этапах развития повреждения

| | Точка А | Точка Б | Точка В | Точка Г |
|---|---|---|---|---|
| Ток фазы *A* | 125 | 135,5 | 146 | 160 |
| Ток фазы *B* | 99 | 93 | 87 | 79 |
| Ток фазы *C* | 126 | 140,4 | 154,8 | 174 |

В табл. 2 показано значение коэффициента *F* в различные моменты развития виткового замыкания в трансформаторе. Для сравнения приведены аналогичные относительные значения для тока обратной последовательности.

*Таблица 2*

Изменение параметров на холостом ходу с развитием повреждения

| | Точка А | Точка Б | Точка В | Точка Г |
|---|---|---|---|---|
| Ток обратной последовательности $\|\bar{I}_2\|$ | 17,1 | 28,7 | 40,2 | 55,4 |
| Коэффициент *F* | 461,7 | 1360,38 | 2725,56 | 5263 |

Точка А соответствует исправному состоянию трансформатора. Чувствительность параметров можно оценить, рассчитав отношения значения величины в некоторой точке к значению в точке А. Чувствительность для рассмотренного случая виткового замыкания графически представлена на рис. 1.




*Рис. 1.* Относительные значения для различных контролируемых параметров на холостом ходу:
*а* – для разработанного коэффициента; *б* – для тока обратной последовательности

Разработан коэффициент, который при измерениях на холостом ходу остается неизменным для исправного трансформатора, а при витковом замыкании возрастает. При этом использование коэффициента дает чувствительность к витковым замыканиям выше, чем использование в качестве критерия тока обратной последовательности.

Разработанный коэффициент может быть использован при создании устройств контроля состояния силовых трансформаторов.

## Библиографический список

1. Антонов, В. О. Анализ статистики технологических отказов функциональных узлов силовых трансформаторов 35 КВ и выше / В. О. Антонов // Вестник науки. – 2024. – Т. 4, № 1(70). – С. 755-762.

2. Архипова, О. В. Анализ существующих подходов к мониторингу и диагностике состояния активной части силовых трансформаторов / О. В. Архипова, В. З. Ковалев, Р. В. Сайфуллин // Вестник Югорского государственного университета. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 96-101.

3. Белов, А. В. Выявление признаков межвитковых замыканий в обмотках потребительских силовых трансформаторов / А. В. Белов, Ю. П. Ильин, Р. В. Банин // АПК России. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 970-979.

4. Разработка способов и средств выявления межвитковых замыканий в обмотках силовых трансформаторов / А. В. Белов, О. Р. Шаймухаметова, Ю. П. Ильин [и др.] // АПК России. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 38-44.

5. М.Л. Сапунков, Н.В. Давыдов. Способ выявления витковых замыканий в обмотках трехфазных трансформаторов // Пат. 2645811 РФ: интернет-ресурс. – URL: http://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2645811&TypeFile=html. Дата обращения: 29.10.2025

© Федоров Р.А., 2026

УДК 621.113:004.9

А.А. ГАЛИЕВА
*alinka-malinka.a.01@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

## СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ И ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

*Аннотация*. Цифровое моделирование в настоящее время является одним из ключевых методов повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем, в частности электрических машин, и основывается на динамической тождественности между поведением физического объекта и его виртуальной копией.

*Ключевые слова*: электрические машины; цифровые двойники; машинное обучение; прогностическое обслуживание.

Электрические машины остаются основой современной промышленности. Их надежность и эффективность напрямую определяют производительность предприятий. Однако традиционные подходы к эксплуатации, основанные на планово-предупредительных ремонтах или реактивном обслуживании, все чаще демонстрируют недостаточную эффективность в условиях современного производства. ППР приводит к избыточной замене еще работоспособных узлов и неоправданным простоям, а реактивный подход – к авариям с тяжелыми последствиями. Возникает объективная потребность в переходе от обслуживания по графику или факту к управлению состоянием оборудования.

Цифровая трансформация открывает новые возможности: вместо того чтобы заменять компоненты по графику или после отказа, инженеры получают

инструменты для прогнозирования состояния оборудования в реальном времени. Эта становится возможным благодаря конвергенции нескольких технологических трендов. В фокусе внимания – цифровые двойники, интеллектуальные системы диагностики на основе машинного обучения и новые подходы к промышленному программированию [1].

Цифровой двойник представляет собой динамическую виртуальную копию физического объекта, которая в реальном времени получает данные от сенсоров и позволяет моделировать различные сценарии работы – от штатных режимов до предаварийных ситуаций. В контексте электрических машин архитектура цифрового двойника включает пять функциональных уровней: физический, коммуникационный, уровень обработки данных, моделирования и прикладной.

Одним из наиболее перспективных подходов является объектно-ориентированное моделирование с использованием платформы Simulink Real Time и технологии HIL (Hardware-in-the-loop). В отличие от классического имитационного моделирования, HIL подразумевает подключение реального контроллера (например, промышленного ПЛК или частотного преобразователя) к виртуальной модели электрической машины. Это позволяет выполнять полноценную виртуальную наладку промышленного оборудования, тестировать алгоритмы управления и аварийные логики до физического ввода в эксплуатацию реальной машины. Инженеры могут искусственно создавать дефекты (например, короткое замыкание в обмотке или дисбаланс ротора) в безопасной виртуальной среде, наблюдая за реакцией системы управления без риска повредить дорогостоящее оборудование [2].

Особого внимания заслуживает методика создания цифрового двойника для синхронных двигателей с постоянными магнитами. В отличие от асинхронных машин, они требуют более сложных гибридных моделей, сочетающих физические принципы с data-driven подходами. Причина кроется в сильно нелинейном поведении постоянных магнитов – их магнитные свойства нелинейно зависят от температуры и токов статора, а также подвержены необратимому размагничиванию при перегрузках. Гибридная модель позволяет компенсировать недостатки чисто физического описания и чисто статистического подхода.

Наиболее развитое практическое применение цифровые двойники получили в системах технической диагностики. Основные типы дефектов, которые могут быть обнаружены, включают износ подшипников, трещины в роторной клетке, повреждения статорной обмотки и несоосность валов.

Интеграция цифрового двойника с методами машинного обучения позволяет не только констатировать наличие дефекта, но и прогнозировать остаточный ресурс. Комбинация вибрационного анализа, спектрального анализа тока статора и теплового моделирования в рамках единого цифрового двойника обеспечивает наиболее высокую точность прогнозов.

Несмотря на впечатляющие достижения, широкое промышленное внедрение рассмотренных технологий сталкивается с рядом препятствий:

– дефицит данных о дефектах: для обучения моделей машинного обучения необходимы размеченные данные о различных типах неисправностей, но в реальных условиях отказы происходят относительно редко;

– дрейф модели: физические характеристики электрической машины изменяются со временем (старение изоляции, изменение зазоров), что требует постоянного переобучения алгоритмов;

– кибербезопасность: подключение критической инфраструктуры к облачным платформам создает новые векторы атак. Решения Positive Technologies для комплекса ЦДЭС включают конвейер безопасной разработки PT Container Security и систему кибербезопасности на базе PT ISIM;

– отсутствие стандартизации: разные производители используют различные форматы данных и протоколы, что затрудняет интеграцию разнородных систем в единый цифровой двойник.

Перспективные направления исследований включают разработку самообучающихся цифровых двойников с использованием федеративного обучения, внедрение blockchain-технологий для обеспечения целостности данных, а также создание plug-and-play архитектур для бесшовного промышленного развертывания [3].

## Библиографический список

1. Электроэнергетические системы и сети. Система и опыт подготовки инженерных и научных кадров / А. А. Волков, С. Г. Гапанюк, А. А. Золотой [и др.]. — Минск : БНТУ, 2013. — 396 с.

2. Логинов Б.М. Методика создания цифровых двойников электромеханических систем на основе Simulink Real Time и моделирования HIL // Электротехнические системы и комплексы. 2025. № 2(67). С. 35-44.

3. Васильев, Б. Ю. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Том 2. Современный промышленный электропривод / Б. Ю. Васильев. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 392 с.

© Галиева А.А., 2026

УДК 621.313

Э.М. ГАРИПОВА, А.Р. ШАРИПОВА
*elzaagaripova@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Т.А. ВОЛКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ОБЗОР ВИДОВ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ТРАНСПОРТЕ

*Аннотация*. В данной статье приведен обзор основных типов электрических двигателей, применяемых в электротранспорте: асинхронные двигатели (АД), синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ). Проведен анализ преимуществ и недостатков данных электрических двигателей. Рассмотрены возможные новейшие технологии для усовершенствования производства ЭД в электротранспорте.

*Ключевые слова*: электротранспорт, электромобиль, электрический двигатель, асинхронный двигатель, синхронный двигатель, БДПТ.

## Введение

Электрический двигатель (ЭД) – устройство для преобразования механической энергии во вращательное движение вращающейся части электрической машины. Применение этот вид двигателей нашел практически во всех отраслях промышленности, например: машиностроение, энергетика, транспорт и логистика. Необходимость развития технологий производства электрических двигателей для транспорта вызвано постепенным истощением ресурсов нефти и газа, повышением экологических требований. Все больше производителей [самые крупные из них: BYD (Китай), Tesla (США)] заняты производством электромобилей и прочего электротранспорта.

На рынке электротранспорта с плотной конкуренцией определяющую роль играет грамотный выбор типа двигателя. В этой статье будет представлен обзор и сравнение электрических двигателей, которые применяются в области транспорта.

## Обзор современных ЭД для электротранспорта

Асинхронный двигатель (АД) – один из самых распространенных типов ЭД. Принцип его действия основан на законе электромагнитной индукции: вращающееся магнитное поле, создаваемое в статоре, индуцирует ток в роторе. Его популярность обусловлена высокой надежностью и долгим жизненным циклом, неприхотливостью в обслуживании, простотой конструкции и сравнительно низкой стоимостью. Однако можно отметить заметное снижение эффективности в режиме частичной нагрузки, т.е. в условиях городской среды. Например, данный тип двигателей применялся в ранних моделях Tesla Model S,

Tesla Model X [1], но большого распространения не получил из-за наличия на рынке синхронных двигателей с постоянными магнитами. На данный момент благодаря своей дешевизне и простоте обслуживания асинхронные двигатели активно применяются в общественном транспорте: метро, трамваи, троллейбусы и т.д.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) – ЭД, в основе работы которого лежит использование постоянных магнитов (вместо обмотки возбуждения) в качестве возбудителя [2]. Магниты, установленные на роторе (поверхностно или встроенно), создают магнитное поле, взаимодействующее с полем статора. Основными преимуществами СДПМ являются: отличное соотношение массы к мощности, высокий КПД благодаря исключению электрических потерь на возбуждение, а также СДПМ способен развивать высокий крутящий момент при старте [3]. К недостаткам можно отнести высокую стоимость редкоземельных магнитов, которые также подвержены риску размагничивания, и пульсации электромагнитного момента, обусловленные низкой индуктивностью на обмотках, и негативно сказывающиеся на характеристиках ЭД. СДПМ используются в большинстве современных электромобилей премиум-класса, гибридных автомобилях, высокоскоростных поездах и даже в современных системах промышленной автоматизации.

Бесколлекторный двигатель постоянного тока (БДПТ) – разновидность СДПМ, управление которым осуществляется при помощи контроллера с обратной связью. Такой контроллер заменяет щеточно-коллекторный узел, благодаря чему БДПТ обладает высокой надежностью, низким уровнем шума при работе, а также отсутствием нагрева якоря. Недостатком является дорогостоящая электроника [4] и ремонт в случае выхода ЭД из строя. Данный тип ЭД наиболее перспективен в производстве электрических машин (ЭМ) в диапазоне малых и средних мощностей.

**Новейшие технологии в производстве ЭД для электротранспорта**

Выбор конкретного типа ЭД зависит от многих факторов, и в первую очередь от приоритетов разработчика и потребителя. Асинхронные двигатели сохраняют свои позиции там, где ключевыми факторами являются отказоустойчивость, низкая стоимость и независимость от редкоземельных материалов. АД на данный момент являются безальтернативным выбором для магистрального железнодорожного транспорта. Синхронные двигатели с постоянными магнитами являются наиболее эффективными на сегодняшний день и занимают доминирующие позиции в области ЭД для современных электромобилей. Бесколлекторные двигатели постоянного тока актуальны для ниши малых и средних мощностей (скутеры, мотоциклы). Однако высокая стоимость СДПМ и его разновидности в виде БДПТ ограничивает их внедрение в массовое производство.

Развитие современных электродвигателей не стоит на месте. Наблюдается переход на технологии, исключающие использование редкоземельных материалов, например [5]:

– разработка новых сплавов для магнитов – к примеру, разработка сплава MnAlV учеными НИТУ МИСИС [6];

– использование электромагнитов вместо постоянных магнитов;

– развитие аксиальных и радиальных ЭД.

Актуальны и исследования по применению передовых материалов в электронике. Массовое внедрение полупроводников на основе карбида кремния (SiC) позволяет увеличить запас хода электромобиля на 5-10%.

**Заключение**

Таким образом, выбор электрического двигателя зависит не только от назначения ЭМ, но и от ее конечной стоимости, надежности, независимости от поставок материалов. С каждым годом появляется все больше инженерных решений по усовершенствованию существующих двигателей, применяемых в электротранспорте. Невозможно упустить и тот факт, что по мере развития технологий и наращивания производства ЭД могут появиться более доступные и экологичные альтернативы существующим электродвигателям.

## Библиографический список


1. Электродвигатели для транспортных средств: от электровелосипедов до электромобилей. [Электронный ресурс] URL: https://inner.su/articles/elektrodvigateli-dlya-transportnykh-sredstv/ (дата обращения 17.04.2026).
2. Сравнительный анализ роторных систем синхронных машин на постоянных магнитах / И. В. Кириллов, Р. Г. Апальков, Н. А. Борисоглебский, А. С. Иванов // Электротехника, электронная техника, информационные технологии: Журнал «The Scientific Heritage». – 2021. – №71. – С. 26-30.
3. Тяговые двигатели электротранспорта, используемые в качестве мотор-колеса / А. В. Махиянов, И. И. Балгазин, С. О. Миниахметова // VII Международная молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ». – 2024. – С. 312-1-312.5.
4. Виды двигателей для электромобилей: сравнительный анализ преимуществ и недостатков / В. А. Безотечество // Журнал «Научный лидер». – 2025. – №29 (230). – С. 47-48.
5. Тенденции развития современных электродвигателей: вызовы, сложности и результаты / П. И. Жердев, Р. Ш. Биксалеев, К. Е. Карпухин // Электротехнические комплексы и системы: Известия МГТУ «МАМИ». – 2025. – Т. 19. – №1. – С. 422-429.
6. Учёные НИТУ МИСИС приблизили создание мощных магнитов без редкоземельных элементов. [Электронный ресурс] URL: https://misis.ru/news/10309/ (дата обращения 21.04.2026).


© Гарипова Э.М., Шарипова А.Р., 2026

УДК 621.311

Г.А. ГРИНИН
*gea2411@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Н.Л. БАБИКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ НА ЭТАПЕ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

*Аннотация.* В статье показана сравнительная эффективность применения компьютерного зрения на этапе визуального контроля при капитальном ремонте печатных плат.

*Ключевые слова:* визуальны контроль, компьютерное зрение, математическая модель, печатная плата, капитальный ремонт.

На отечественных промышленных предприятиях, занятых производством и ремонтом микроэлектроники, блоков автоматики и т.п. возникают задержки при капитальном ремонте вышеуказанного оборудования. На каждом этапе капитального ремонта возникает ряд проблем, приводящий к увеличению времени проведения работ [1], а также к снижению эффективности выявления брака. Самым трудоёмким этапом является контроль дефектов печатных плат и их компонентов. Наиболее распространенным методом контроля на отечественных промышленных предприятиях является визуально-оптический. Данный метод сильно зависит от квалификации, обеспеченности, и физического состояния сотрудника, проводящего контроль.

Целью данной работы является оценка эффективности визуального контроля дефектов печатных плат и их компонентов при капитальном ремонте путём сравнительного анализа методов визуального контроля на основе разработанной математической модели, нацеленной на повышение количества выявленных дефектов при капитальном ремонте печатных плат и их компонентов.

Математическую модель будем основывать на формуле расчёта parts per million (ppm) для паяных соединений при обнаружении дефектов на производстве печатных плат указанной в [2]. Выглядит она следующим образом:

$$ppm = \frac{\text{Общее число дефектов}}{\text{Общее число паяных соединений в партии продукции}} \times 10^6. \qquad (1)$$

Формула (1) учитывает все дефекты в серии печатных плат пришедших на капитальный ремонт, без учёта специфики визуального контроля. Чтобы

данная формула учитывала специфику визуального контроля введём коэффициент α, который будет характеризовать процент найденных дефектов. Соответственно формула (2) для расчёта ppm будет выглядеть так:

$$ppm = \frac{\text{Общее число дефектов} \times \alpha}{\text{Общее число паяных соединений в партии продукции}} \times 10^6. \quad (2)$$

Согласно статье [3] человек без специального инструмента, на промышленном предприятии, может определить порядка 80% дефектов, соответственно коэффициент α=0,8. Но т.к. на предприятиях применяются специальные инструменты для визуального контроля печатных плат и их компонентов, то коэффициент возрастает α=0,95.

Стоит отметить, что специфика визуального контроля человеком заключается в том, что человеческий глаз не может заметить дефект размером меньше 100 микрон, и при этом после 2-3 часов работы эффективность визуального контроля человеком снижается 30–40%. Коэффициент α для длительного контроля человеком снижается до 0,65 [3].

Для конкретизации результатов сравнительного анализа математической модели рассмотрим случай, когда на предприятии ежегодно проходит масштабный капитальный ремонт печатных плат. Данные для математической модели представлены в табл. 1 и взяты из ГОСТ Р МЭК 61193-12015.

*Таблица 1*

Данные для математической модели

| Исходные данные | | Расчётные данные | | |
|---|---|---|---|---|
| Число плат на ремонте, шт | Число дефектов, шт | Фактический ppm | *ppm* при визуальном контроле человеком | *ppm* при длительном визуальном контроле человеком |
| 500 | 35 | 85,3 | 81,1 | 55,5 |
| 1000 | 68 | 82,9 | 78,7 | 53,9 |
| 1500 | 100 | 81,3 | 77,2 | 52,8 |
| 2000 | 130 | 79,2 | 75,3 | 51,5 |
| 2500 | 150 | 73,1 | 69,5 | 47,5 |

Число паяных соединений для всех типов плат – 820.

Математическая модель зависимости *ppm* от количества плат на капитальном ремонте представлен на рис. 1.

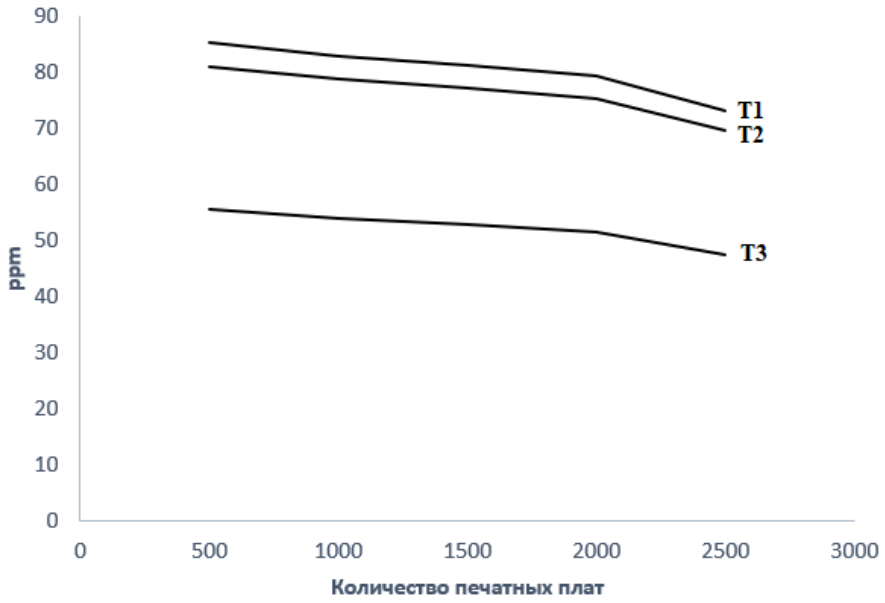



*Рис.1*. График зависимости ppm от количества печатных плат на капитальном ремонте:

*T1* – фактический ppm, то есть фактическое количество дефектов печатных плат и их компонентов в серии;

*T2* – ppm при визуальном контроле дефектов печатных плат и их компонентов методом визуального контроля человеком с применением специальных инструментов;

*T3* – ppm при визуальном контроле дефектов печатных плат и их компонентов методом визуального контроля человеком с применением специальных инструментов

Как видно из модели, разница между *ppm* кривой *T*1 и ppm кривой *T*2 составляет 5,2%. Разница между ppm кривой *T*1 и *ppm* кривой *T*3 составляет 53%. Исходя из этого при визуальном контроле дефектов печатных плат и их компонентов человеком с применением инструментов до 5,2% дефектов останутся не найденными, а при длительном визуальном контроле дефектов печатных плат и их компонентов до 53% дефектов не будут обнаружены, и на последующих этапах капитального ремонта будет выявлен брак.

Для повышения эффективности выявления дефектов на этапе визуального контроля печатных плат и их компонентов предлагается внедрить технологию компьютерного зрения с применением аппарата для проверки и ремонта печатных плат [4].

Для оценки эффективности применения компьютерного зрения на стадии визуального контроля, при капитальном ремонте печатных плат и их компонентов, возьмём данные из исследования [5]. Авторы исследования приводят примеры различных архитектур нейросетей, на которых основывается визуальный анализ. Новейшей и отличающейся высокими характеристиками в плане скорости и точности анализа является архитектура YOLOv8. Авторы данного исследования, с помощью тестовых изображений эталонных плат и набора данных содержащий изображения дефектов печатных плат, обучили нейросеть определять дефекты, характеризовать их и т.д. Были использованы

различные методы обучения и настройки нейросети. В результате нейросеть архитектуры YOLOv8, обученная на визуальный контроль печатных плат, с точностью 98% определяет дефекты. Это соответствует коэффициенту α=0,98.

На рис. 2 представлено сравнение ppm визуального контроля дефектов печатных плат и их компонентов при методе визуального контроля человеком с применением специальных инструментов и ppm визуального контроля дефектов печатных плат и их компонентов с применением технологии компьютерного зрения и аппарата для проверки и ремонта печатных плат.

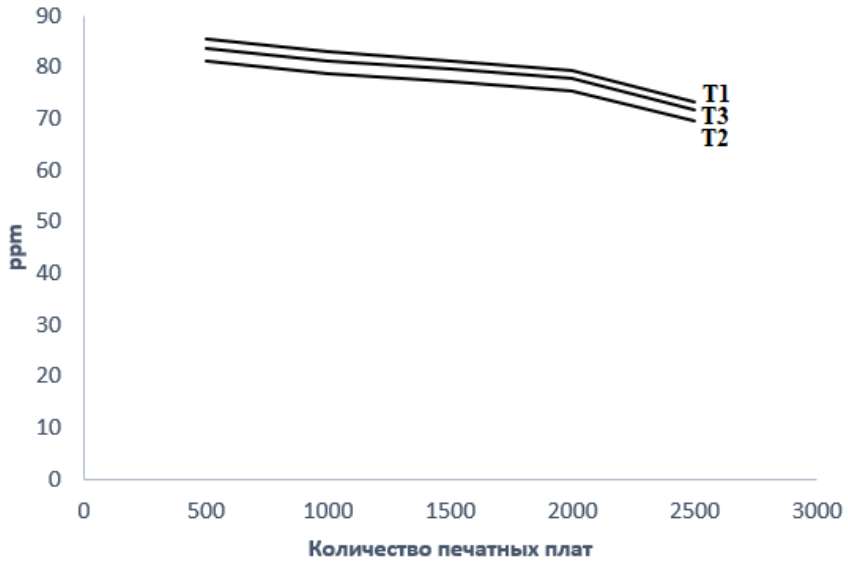



*Рис.2.* График зависимости ppm от количества печатных плат на капитальном ремонте:

*T1* – фактический ppm, то есть фактическое количество дефектов печатных плат и их компонентов в серии;

*T2* – ppm при визуальном контроле дефектов печатных плат и их компонентов методом визуального контроля человеком с применением специальных инструментов;

*T3* – ppm при визуальном контроле дефектов печатных плат и их компонентов с помощью компьютерного зрения и аппарата проверки и ремонта

Как видно из графика разница между *ppm* кривой *T*1 и ppm кривой *T*3 составляет 2%, что значительно лучше, чем при методе визуального контроля человеком (5,2%).

Исходя из полученных данных, можно утверждать, что внедрение технологии компьютерного зрения при визуальном контроле печатных плат и их компонентов при капитальном ремонте положительно скажется на его эффективности. Стоит отметить, что финансовая составляющая внедрения компьютерного зрения требует дополнительного рассмотрения в других работах.

В ходе проделанной работы была проведена оценка эффективности методов визуального контроля печатных плат и их компонентов при капитальном ремонте на основе разработанной математической модели. Для

повышения эффективности визуального контроля дефектов печатных плат была предложена архитектура нейросети и аппарат для проверки и ремонта печатных плат.

## Библиографический список

1. Алибаев, Р. И. Развитие организации труда персонала электроэнергетической компании / Р. И. Алибаев, А. Ю. Трофимов, Н. Л. Бабикова // Архонт. – 2025. – № 4(55). – С. 308-312. – EDN DJFHJO.

2. ГОСТ Р МЭК 61193 12015. Методы оценки надёжности электронных сборок. Часть 1. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2016.

3. Быстрые методы контроля качества: как определить брак без сложного оборудования // КООП Медиа URL: https://media.coop-tech.ru/articles/tehnologiya/bystrye-metody-kontrolya-kachestva/ (дата обращения: 28.04.2026).

4. Аппарат для проверки и ремонта печатных плат: патент KR 102549486B1 / Заявл. [29.12.2022] ; опубл. [29.06.2023].

5. Инютин, А. В. Детекция дефектов печатных плат на основе архитектуры YOLOv8 = PCB defect detection based on YOLOv8 architecture / А. В. Инютин, М. М. Лукашевич // Системный анализ и прикладная информатика. – 2024. – № 2. – С. 16-24.

© Гринин Г.А., 2026

УДК 621.317.7.089.6

Д.С. ГУСЕВ, Е.Г. ЗАКИРНИЧНЫЙ
*dullrodger@yandex.ru*

***Уфимский университет науки и технологий***
***Уфимский государственный нефтяной технический университет***

# КАЛИБРОВКА МИКРООММЕТРА ИКС-200А

*Аннотация*. Проведение неразрушающего контроля для определения остаточных механических напряжений является актуальной задачей во время производства, эксплуатации, сварки и др. При этом выбор метода контроля должен быть основан на достоверных данных. В статье рассматривается метод неразрушающего контроля, основанный на измерении электросопротивления изделия и сопоставления показания с результатами механических напряжений с помощью градуировочной зависимости.

*Ключевые слова*: Неразрушающий контроль, электросопротивление, микроомметр, калибровка, градуировочная зависимость.

**Введение**

В настоящее время в большинстве отраслей техники после технологических операций (деформирование, сварка, термическая обработка и др.) для неразрушающего контроля остаточных механических напряжений широко применяют методы измерения твердости, а также магнитные и ультразвуковые методы.

Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела. Твердость давно и широко используется в практике исследовательских лабораторий и промышленных предприятий. Она отражает многие эксплуатационные свойства материалов, в том числе сопротивляемость истиранию, режущие свойства, способность выдерживать местные давления, способность обрабатываться резанием, механические свойства (предел текучести, временное сопротивление) при растяжении и т.д.

Для определения твердости используют статические (Бринелля, Виккерса, Роквелла, микротвердости), динамические (Шора, Польди и др.) и кинетические метод [1-3].

Магнитный и ультразвуковые методы контроля можно рассмотреть на примере методического пособия [4]. Недостатком магнитного метода контроля является магнитные свойства проявляются только в ферромагнитных сплавах, и этот способ не применим, например, к алюминиевым сплавам, а также большой размер базы исследования, т.е. невозможность произвести локальное измерение в угловом сварном соединении (наплавленном металле или в зоне термического влияния). Недостатками ультразвукового метода неразрушающего контроля являются трудоёмкость и низкая точность метода. Это связано с необходимостью устанавливать большое количество трудно определяемых характеристик упругости второго и третьего порядка, а также предварительно проводить дополнительные исследования механических свойств на напряжённых и свободных от внешней нагрузки образцах материала.

Так в отличие от других методов контроля, которые дают данные о наличие дефекта, предлагаемый метод контроля позволяет получить данные о напряженном состоянии изделия в конкретной точке измерения[5]. Также предполагается использовать прибор для контроля изделий из неферромагнитных материалов.

Среди существенных недостатков при применении данного метода является необходимость калибровки прибора для каждой марки металла, а также высокая стоимость оборудования.

Целью данной работы является калибровка средств измерения – получение зависимостей между показаниями значений электросопротивления (мкОм/Ом), деформаций и механических напряжений (МПа) при растяжении образца. Под калибровкой средства измерения понимается определение шкал соответствия между показаниями приборов и значениями напряжений при растяжении

**Материал и методика проведения эксперимента**

Для эксперимента применялись следующие образцы из стали 09Г2С (рисунок 1). Механические свойства, а также геометрические размеры образца представлены в таблице 1, где данные механических характеристик для образца получены по сертификату качества завода изготовителя материала.

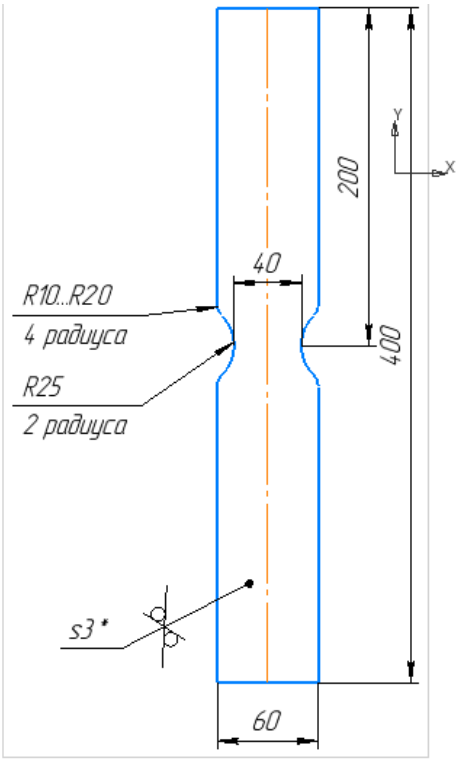



*Рис. 1.* Образец из стали марки 09Г2С

*Таблица 1*

Механические свойства и геометрические характеристики металла

| Название нормативного документа | Механические свойства стали | |
|---|---|---|
| | $\sigma_t$ МПа | $\sigma_в$ МПа |
| ГОСТ на сталь 09Г2С | не менее 340 | не менее 430 |
| Образец из стали для разрывной машины | 395 | 520 |

Для измерения электрического сопротивления контактов высоковольтных выключателей и разъединителей, болтовых и сварных соединений (сильноточных цепей) использовался микроомметр ИКС-200А (рисунок 2), позволяющий измерять электрическое сопротивление измерительным током до 200 А и измерительные контакты которого во время эксперимента прикреплялись к образцу.




*Рис. 2.* Внешний вид микроомметра ИКС-200А

Технические характеристики прибора представлены в таблице 2.

*Таблица 2*

Характеристика микроомметра

| Характеристика | Размерность |
|---|---|
| Диапазон измеряемого электрического сопротивления | 1 мкОм…0,1 Ом |
| Измерительный ток | 10…200 А |
| Базовая погрешность измерения | ±0,1% |
| Время готовности к работе, не более | 5 с |
| Время одного быстрого измерения, не более | 3 с |
| Время одного длинного измерения | до 30 с |
| Интервал времени между измерениями, не менее | 10 с |

Эксперименты проводили согласно [6] в заводской лаборатории ЗАО «Нефтемонтаждиагностика» при температуре в помещении 20°С и влажности 78%. На разрывной машине ИР 5145-500 (рисунок 3), управление которой осуществляется через подсоединенный к ней компьютер и контрольную выносную панель, производили растяжение образцов. Скорость разрывной машины при растяжении составляла 0,1 мм/мин.



*Рис. 3.* Разрывная машине ИР 5145-500

В ходе исследования на поверхность образца прикрепляют зажимы измерительного прибора, затем закрепляют образец в разрывной машине и приступают к испытанию на растяжение.

Образец растягивают с постоянной скоростью до разрыва, при этом снимают показания прибора. Затем данные, полученные из эксперимента, обрабатывают, строят градуировочную зависимость, которая представляет собой графики зависимости механического напряжения от деформации и зависимости электросопротивления от деформации, где по оси абсцисс откладывают относительную деформацию, а по осям ординат относительное механическое напряжение и относительное электрическое сопротивление материала образца. Показания, полученные по эксперименту, были усреднены и по ним построена градуировочная зависимость, представленная на рисунке 4.

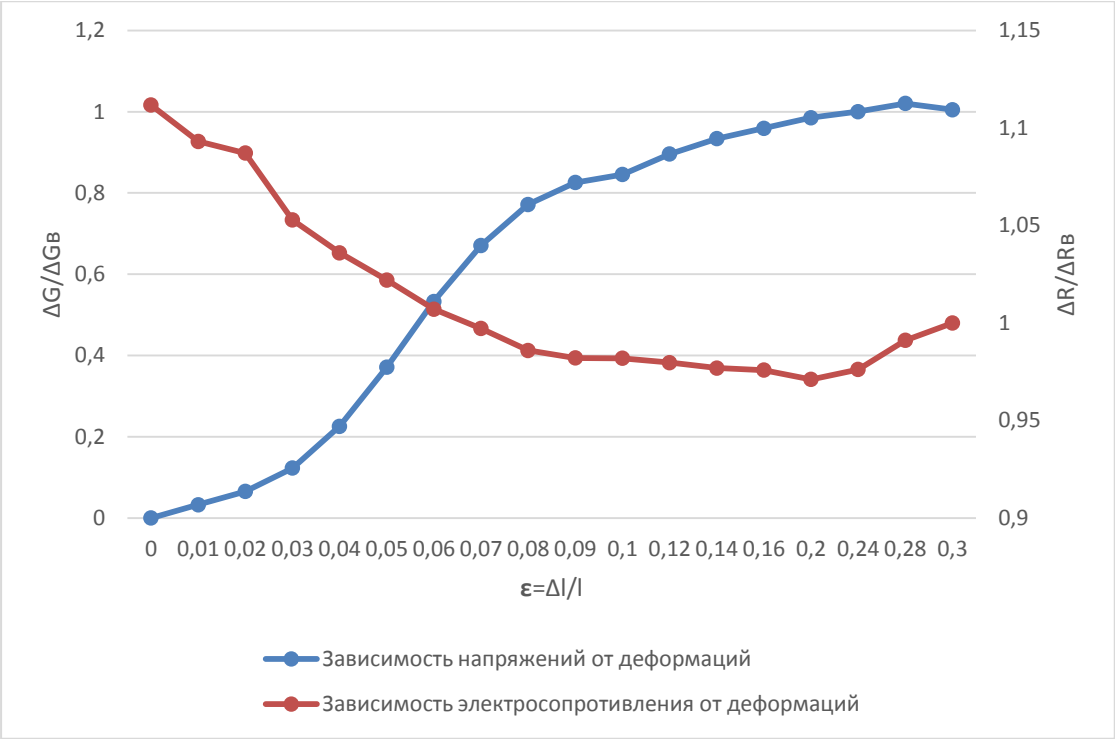



*Рис. 4.* График зависимости механических напряжений от разницы показаний микроомметра

Эту зависимость можно использовать в процессе контроля основной конструкции. При контроле измеряется электрическое сопротивление локального участка конструкции посредством внешнего средства измерения электрического сопротивления и по градуировочной характеристике определяется значение механического напряжения в конструкции.

Таким образом можно сделать вывод о том, что с помощью микроомметра существует возможность определения механических напряжений в любом металлическом изделии и облегчение вычисления механических напряжений. В дальнейшем прибор будет откалиброван на алюминиевом сплаве, что при положительном результате позволит использовать прибор при диагностики неферромагнитном материале.

## Библиографический список

1. Определение механических свойств металла по результатам измерения твердости методом Роквелла: учебно-методическое пособие к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Изменение свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации" / УГНТУ, каф. ТМО ; сост.: И. Р. Кузеев, Е. А. Наумкин, Ю. С. Ковшова. - Уфа : УГНТУ, 2016. – С.24.

2. Определение твердости металлов и сплавов по методу Роквелла с использованием прибора ТР-150П : учебно-методическое пособие к лабораторной работе / УГНТУ, каф. ТНА ; сост. М. А. Худяков. - Уфа : УГНТУ, 2016. – С.8.

3. Определение твердости металлов и сплавов по методу Виккерса с использованием прибора HVS-5 : учебно-методическое пособие к лабораторной работе / УГНТУ, каф. ТНА ; сост. М. А. Худяков. - Уфа : УГНТУ, 2016. – С.8.

4. Оценка технического состояния оборудования : учебно-методическое пособие по выполнению практических работ / УГНТУ, каф. ТМО ; сост. А. В. Рубцов [и др.]. - Уфа : УГНТУ, 2012. – С.194.

5. Блохин, А. В. Электросопротивление как структурно-чувствительная характеристика при усталостных испытаниях металлических конструкционных материалов / А. В. Блохин, С. Е. Бельский // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2006. - С. 248-250.

6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.

© Гусев Д.С., Закирничный Е.Г., 2026

УДК *621.314.21*

Д.Р. ХИБАТУЛЛИН
*danil_khibatullin@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент З.Г. ГАБИДУЛЛИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## АМОРФНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ: ПРЕИМУЩЕСТВА, ОГРАНИЧЕНИЯ И МИРОВОЙ ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ

*Аннотация*. В статье рассмотрены аморфные трансформаторы как техническое решение для снижения потерь электроэнергии в распределительных сетях. Показано, что ключевой эффект связан с уменьшением потерь холостого хода за счёт применения сердечника из аморфного сплава. Кратко раскрыты преимущества, ограничения и мировой опыт внедрения технологии в Японии, странах Азии, Европе, США и России.

*Ключевые слова*: аморфный трансформатор; распределительная сеть; потери холостого хода; энергоэффективность; магнитопровод.

Распределительные трансформаторы относятся к числу наиболее распространенных элементов электрических сетей. Они работают не только в часы высокой нагрузки, но и в периоды малой нагрузки, когда трансформатор остаётся включённым в сеть. Поэтому технические потери в таких аппаратах складываются из двух разных составляющих: потерь холостого хода в магнитопроводе и нагрузочных потерь в обмотках. Для сетей 6-10/0,4 кВ основной является первая составляющая, поскольку она присутствует всё время, пока трансформатор находится под напряжением [1].

Аморфный трансформатор отличается от традиционного прежде всего материалом магнитопровода. В обычных трансформаторах широко применяется электротехническая сталь с ориентированной зернистой структурой, в аморфных же трансформаторах используется металлический сплав на основе железа, бора и кремния. Такой сплав получают сверхбыстрым охлаждением расплава, из-за чего в материале не формируется дальний кристаллический порядок. В промышленных конструкциях материал выпускается в виде тонкой ленты толщиной порядка десятков микрометров, поэтому аморфные магнитопроводы чаще выполняются навитыми [1].

С физической точки зрения повышение эффективности связано с магнитными потерями. При перемагничивании сердечника возникают гистерезисные потери, а при изменении магнитного потока – потери от вихревых токов. Аморфная структура облегчает перемагничивание, а малая толщина ленты и повышенное электрическое сопротивление уменьшают вихревые токи. В результате аморфный сердечник может иметь существенно меньшие потери в сравнении с сердечником из обычной кремнистой стали. По данным ABB Review, снижение потерь в сердечнике может достигать примерно 70 % по сравнению с обычными материалами сердечника [1].

Главное практическое преимущество аморфных трансформаторов заключается в уменьшении потерь холостого хода. Это особенно важно для сельских распределительных сетей, сетей с сезонным потреблением, объектов социальной инфраструктуры, малозагруженных подстанций и участков с большим количеством постоянно включённых трансформаторов. Если трансформатор большую часть времени работает при малой нагрузке, то снижение потерь в магнитопроводе может оказаться экономически значимее, чем небольшие различия в нагрузочных потерях.

Экономическая оценка таких трансформаторов не сводиться только к закупочной цене. В рекомендациях по энергоэффективным трансформаторам и материалам производителей подчёркивается необходимость учитывать совокупную стоимость владения, включающую первоначальную цену, стоимость потерь за срок службы и режим эксплуатации [2, 3]. Отсюда следует, что аморфный трансформатор может быть дороже при покупке, но при длительной эксплуатации в постоянно включённом режиме его меньшие потери холостого хода способны компенсировать более высокую начальную стоимость.

При этом аморфные трансформаторы имеют не только преимущества, но и конструктивные ограничения. Аморфный сплав более чувствителен к механической обработке, а технология изготовления сердечника требует аккуратного обращения с тонкой лентой и последующего термомагнитного отжига. Из-за меньшей магнитной индукции насыщения по сравнению с ориентированной электротехнической сталью сердечник и обмотки могут иметь большие габариты. Также отмечается возможное увеличение уровня шума на несколько децибел, что связано с особенностями магнитострикции материала [1].

Отдельная группа ограничений связана с рынком и цепочками поставок. Массовый переход на аморфные сердечники требует достаточного производства аморфной ленты, перестройки части технологических операций и подготовки производителей трансформаторов. Поэтому даже при наличии всех вышеперечисленных факторов внедрение должно быть постепенным и экономически обоснованным. В обсуждении американских стандартов энергоэффективности отраслевые организации указывали на риски дефицита материалов и производственных мощностей при слишком резком ужесточении требований [4].

Мировой опыт внедрения показывает, что аморфные трансформаторы развивались прежде всего там, где снижение сетевых потерь стало частью государственной энергетической политики. В Японии такие аппараты продвигались в рамках повышения эффективности распределительного оборудования. В публикациях Hitachi подчёркивается, что аморфные трансформаторы имеют очень низкие потери холостого хода и особенно эффективны при низкой и средней загрузке, характерной для значительной части распределительных сетей [5].

В Европе развитие низкопотерных трансформаторов связано с требованиями экодизайна. Европейская комиссия указывает, что регулирование трансформаторов уже обеспечило экономию электроэнергии в 2020 г., а к 2030 г. ожидаемая экономия должна увеличиться до 17 ТВт·ч в год [6]. Эти меры не сводятся только к аморфным сердечникам, но создают общий спрос на конструкции с низкими потерями, включая трансформаторы с аморфным магнитопроводом.

В США регулирование также усиливается. Министерство энергетики США в 2024 г. приняло обновлённые стандарты энергоэффективности для распределительных трансформаторов. Ведомство указало, что новые требования должны быть технологически реализуемыми и экономически оправданными, а срок соблюдения новых норм установлен с 23 апреля 2029 г. [7].

Российский опыт внедрения пока выглядит более точечным. В 2023 г. сообщалось о применении в филиале «Россети Центр» – «Белгородэнерго» энергоэффективных силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали. Первые пять аппаратов мощностью от 160 до 630 кВА были установлены на объектах Белгородского района и Старооскольского городского округа, а заявленное снижение потерь холостого хода связывалось именно с применением аморфной стали [8]. Этот пример показывает, что технология уже рассматривается российскими сетевыми организациями, но пока не стала массовым стандартом.

Для распределительных сетей аморфные трансформаторы наиболее предпочтительны при адресной замене оборудования. Приоритетными объектами можно считать трансформаторные пункты с длительной работой под напряжением, низким или средним коэффициентом загрузки, высокой стоимостью потерь и постоянным режимом эксплуатации. Менее очевидна

эффективность там, где трансформатор часто работает близко к номинальной нагрузке, где преобладают нагрузочные потери, либо где более высокая цена и габариты осложняют замену.

Таким образом, аморфные трансформаторы являются эффективным средством снижения технических потерь в распределительных сетях, но не универсальной заменой всех традиционных аппаратов. Их сильной стороной является значительное уменьшение потерь холостого хода, что даёт экономическое и экологическое преимущество на протяжении срока службы. Основные ограничениями выступают: более высокая начальная стоимость, технологическая сложность производства, требования к цепочкам поставок, возможные особенности по габаритам и шуму. Рациональная стратегия внедрения состоит в технико-экономическом отборе объектов, где снижение постоянных потерь даёт наибольший эффект по совокупной стоимости владения.

**Библиографический список**

1. Distribution goes green // ABB Review. 2012. № 2. P. 40-47. URL: https://library.e.abb.com/public/f28b7caf32af14e8c1257a25002f2717/40-47%202m221_EN_72dpi.pdf (дата обращения: 01.05.2026).

2. United for Efficiency. Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient Transformers. Paris: United Nations Environment Programme, 2017. 103 p. URL: https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2017/11/U4E-TransformersGuide-201711-Final.pdf (дата обращения: 01.05.2026).

3. Metglas, Inc. Distribution Transformer Electrical Steel from Metglas: электронный ресурс. URL: https://metglas.com/distribution-transformer-electrical-steel/ (дата обращения: 01.05.2026).

4. National Electrical Manufacturers Association. Comments of the National Electrical Manufacturers Association on Energy Conservation Standards for Distribution Transformers. Washington, 2023. 17 p. URL: https://www.nema.org/docs/default-source/advocacy-document-library/nema-comments-on-distribution-transformers-nopr-march-27-2023.pdf (дата обращения: 01.05.2026).

5. Amorphous Transformer Contributing to Global Environmental Protection // Hitachi Review. 2011. URL: https://www.hitachihyoron.com/rev/pdf/2011/r2011_05_113.pdf (дата обращения: 01.05.2026).

6. European Commission. Power Transformers: электронный ресурс. URL: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/power-transformers_en (дата обращения: 01.05.2026).

7. Energy Conservation Program: Energy Conservation Standards for Distribution Transformers // Federal Register. 2024. Vol. 89. No. 78. P. 29834-30043. URL: https://www.federalregister.gov/documents/2024/04/22/2024-07480/energy-conservation-program-energy-conservation-standards-for-distribution-transformers (дата обращения: 01.05.2026).

8. В «Белгородэнерго» приступили к установке инновационных трансформаторов // Коммерсантъ. 2023. 30 окт. URL: https://www.kommersant.ru/doc/6310706 (дата обращения: 01.05.2026).

© Хибатуллин Д.Р., 2026

УДК 621.314.21

Д.Р. ХИБАТУЛЛИН
*danil_khibatullin@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент З.Г. ГАБИДУЛЛИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ВЛИЯНИЕ АМОРФНЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НАДЁЖНОСТЬ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*Аннотация.* Рассмотрено влияние распределительных трансформаторов с аморфными магнитопроводами на показатели качества электроэнергии и эксплуатационную надёжность сетей низкого и среднего напряжения. Показано, что основной технический эффект таких магнитопроводов связан со снижением потерь холостого хода, уменьшением тепловой нагрузки и повышением энергоэффективности, а не с прямой компенсацией гармоник или отклонений напряжения.

*Ключевые слова*: аморфный магнитопровод; распределительный трансформатор; качество электроэнергии; потери холостого хода; гармоники; надёжность сети.

Качество электроэнергии в распределительных сетях определяется не только параметрами источника питания, но и режимами работы сетевых элементов: линий, трансформаторов, устройств компенсации реактивной мощности и нелинейных нагрузок. В практике исходной нормативной базой является ГОСТ 32144-2013, который устанавливает показатели и нормы качества электроэнергии в точках передачи электрической энергии пользователям сетей низкого, среднего и высокого напряжения переменного тока частотой 50 Гц [1]. Поэтому влияние аморфных магнитопроводов следует оценивать по их связи с отклонением напряжения, несинусоидальностью, несимметрией, переходными процессами и устойчивостью работы оборудования.

Аморфные магнитопроводы применяются прежде всего в распределительных трансформаторах с малыми потерями холостого хода. Их физическое преимущество связано с неупорядоченной структурой металлической ленты, высокой магнитной проницаемостью при малых полях и сравнительно низкими удельными потерями при перемагничивании. В [2]

показано, что аморфные магнитные сплавы имеют важное прикладное значение для снижения потерь в электроэнергетическом оборудовании, особенно в трансформаторах распределительного уровня. Для сети это означает сокращение постоянной составляющей технических потерь, которая присутствует всё время, пока трансформатор находится под напряжением, даже при малой загрузке.

С точки зрения качества электроэнергии аморфный магнитопровод не является самостоятельным средством регулирования напряжения. Он не заменяет регулировочные ответвления, автоматическое регулирование под нагрузкой, батареи конденсаторов, статические компенсаторы или фильтры гармоник. Его влияние носит косвенный характер, снижение потерь холостого хода уменьшает нагрев активной части трансформатора, снижает потребление активной мощности на собственные потери и уменьшает долю энергии, бесполезно рассеиваемой в распределительной сети. В протяжённых сетях с большим числом малозагруженных трансформаторов такой эффект становится существенным для баланса потерь, но сам по себе он не гарантирует соблюдение норм по отклонению напряжения у потребителя. Важным инженерным преимуществом является уменьшение тепловой нагрузки. Чем ниже потери в стали, тем меньше тепловыделение в магнитной системе при длительной работе под напряжением. Это благоприятно для изоляции, масла, уплотнений и контактных соединений, поскольку долговечность трансформатора существенно зависит от теплового режима. При этом качество конкретного аморфного сердечника определяется технологией изготовления. Автор работы [3] показал, что даже при низких потерях аморфной ленты в готовом сердечнике возможна деградация потерь, связанная с распределёнными зазорами и режимами отжига, следовательно, выигрыш достигается только при правильной технологии сборки и термообработки.

Отдельно следует рассматривать гармонические искажения. В распределительных сетях растёт доля нелинейных нагрузок. Такие нагрузки формируют несинусоидальные токи, а искажённое напряжение, в свою очередь, влияет на магнитный режим трансформатора. Установлено, что гармоники напряжения увеличивают потери холостого хода и ток намагничивания, причём результат зависит не только от амплитуды, но и от фазы гармонических составляющих относительно основной частоты [4]. Это означает, что при выборе аморфного трансформатора нельзя ограничиваться паспортным значением потерь при синусоидальном напряжении: необходимо учитывать фактический спектр напряжения в узле установки.

Аморфные магнитопроводы могут быть полезны в сетях с искажённой формой напряжения за счёт меньших удельных магнитных потерь, но их установка не устраняет первопричину гармоник. Если в узле присутствуют мощные нелинейные потребители, главными мерами остаются обследование качества электроэнергии, расчёт суммарного коэффициента гармонических составляющих, подбор фильтров, корректное разделение искажающих нагрузок, а также проверка нагрева трансформатора при несинусоидальном

токе. Аморфный магнитопровод в такой системе повышает энергетическую эффективность, но не рассматривается как фильтрующее устройство. Надёжность распределительной сети связана не только с безотказностью одного трансформатора, но и с последствиями его работы для защиты коммутационной аппаратуры и соседних потребителей. Для трансформаторов с аморфными сердечниками важны токи включения. При неблагоприятной фазе включения, остаточной намагниченности и насыщении сердечника ток намагничивания может кратковременно возрастать, вызывая провалы напряжения и ложные срабатывания защит. Поэтому при массовой замене трансформаторов на аморфные аналоги необходимы расчёт токов включения, проверка предохранителей и релейной защиты, оценка чувствительности потребителей к кратковременным провалам напряжения.

Практический опыт эксплуатации показывает, что сама технология не является экспериментальной. В отчёте EPRI указано, что в США за первые 15 лет внедрения электрические компании приобрели и установили более 500 тыс. аморфных трансформаторов, а полевой опыт был признан удовлетворительным [5]. При качественном проектировании и соблюдении правил эксплуатации аморфный магнитопровод не должен рассматриваться как фактор, автоматически снижающий ресурс распределительного трансформатора.

Современная оценка регуляторов также стала более взвешенной. В правиле Министерства энергетики США 2024 года указано, что аморфные трансформаторы могут быть разумно взаимозаменяемы с трансформаторами на зерноориентированной электротехнической стали без ухудшения эксплуатационных характеристик. При этом отдельно обсуждаются замечания о шуме, хрупкости сердечника, феррорезонансе и увеличении массы [6]. Для проектировщика это означает, что решение о применении аморфного магнитопровода должно приниматься не по одному показателю потерь, а по совокупности критериев таких как нагрузочный график, уровень гармоник, схема коммутации, масса, габариты, акустические требования, цена владения и доступность сервисной поддержки. В европейской практике переход к энергоэффективным трансформаторам поддерживается требованиями экодизайна. Европейская комиссия указывает, что правила экодизайна охватывают минимальные уровни энергоэффективности трансформаторов мощностью от 1 кВА, применяемых в сетях 50 Гц и промышленных установках, а Регламент (ЕС) 548/2014 стимулировал выпуск более эффективных моделей и снижение затрат жизненного цикла [7]. Распределительный трансформатор рассматривается не только как элемент передачи мощности, но и как источник постоянных технических потерь, влияющих на экономику сети.

Для российских распределительных сетей наибольший эффект от аморфных магнитопроводов ожидаем в узлах с длительно включёнными и неполностью загруженными трансформаторами, к примеру, сельские сети, коммунальная инфраструктура, объекты с выраженной ночной разгрузкой, малые подстанции с большим числом часов работы в режиме низкой нагрузки.

В таких условиях доля потерь холостого хода в годовом балансе особенно заметна. Если же трансформатор большую часть времени работает при высокой загрузке, возрастает роль нагрузочных потерь в обмотках, и преимущество аморфного сердечника должно проверяться расчётом суммарных годовых потерь.

Аморфные магнитопроводы положительно влияют на работу распределительных сетей прежде всего через снижение потерь холостого хода, уменьшение нагрева и потенциальное повышение ресурса изоляционной системы. Их вклад в качество электроэнергии является косвенным: они уменьшают энергетические потери и тепловую нагрузку, но не заменяют средства регулирования напряжения и фильтрации гармоник. Надёжное внедрение требует анализа спектра напряжения, токов включения, риска феррорезонансных режимов, акустических ограничений, уставок защит и экономики жизненного цикла. Поэтому аморфные трансформаторы целесообразно применять не как универсальную замену, а как энергоэффективное решение для тех участков сети, где режим нагрузки и эксплуатационные условия позволяют реализовать их преимущества без ухудшения надёжности и качества электроснабжения.

**Библиографический список**

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL: https://protect.gost.ru/gost/details/198e3b90-1710-4ca8-ab15-c891d8012f39 (дата обращения: 01.05.2026).

2. Hasegawa, R. Applications of amorphous magnetic alloys // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375-377. P. 90-97. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.258. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509303010451 (дата обращения: 01.05.2026).

3. Li, D., Zhang, L., Li, G., Lu, Z., Zhou, S. Reducing the core loss of amorphous cores for distribution transformers // Progress in Natural Science: Materials International. 2012. Vol. 22, No. 3. P. 244-249. DOI: 10.1016/j.pnsc.2012.04.005. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007112000512 (дата обращения: 01.05.2026).

4. Kefalas, T. D., Kladas, A. G. Harmonic impact on distribution transformer no-load loss // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57, No. 1. P. 193-200. DOI: 10.1109/TIE.2009.2030207. URL: https://researchportal.tuni.fi/en/publications/harmonic-impact-on-distribution-transformer-no-load-loss/ (дата обращения: 01.05.2026).

5. Amorphous Metal Transformer: Next Steps / Electric Power Research Institute. Palo Alto, 2009. URL:

https://restservice.epri.com/publicdownload/000000000001017898/0/Product (дата обращения: 01.05.2026).

6. Energy Conservation Program: Energy Conservation Standards for Distribution Transformers: Final Rule / U.S. Department of Energy // Federal Register. 2024. URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-04/dt_ecs_fr.pdf (дата обращения: 01.05.2026).

7. Power Transformers: Ecodesign Requirements / European Commission. URL: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/power-transformers_en (дата обращения: 01.05.2026).

© Хибатуллин Д.Р., 2026

УДК 631.3:621.313.323

А.А. ИСХАКОВ
ishakovarsen02@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент К.А. БАРАБАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНЫХ (*BLDC*) ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯТОРОВ

*Аннотация*. Проводится анализ применения бесщёточных электродвигателей постоянного тока. Также рассмотрены их конструктивные особенности и были

*Ключевые слова*: бесщеточный электродвигатель, робототехника, манипулятор, *BLDC*.

В эпоху цифровизации и автоматизации нельзя не заметить актуальность робототехнических манипуляторов. Робототизация производств и медицинских устройств требует всё более и более жёсткие требования к приводам манипуляторов. Традиционные коллекторные ДПТ и шаговые приводы постепенно сдают позиции бесщёточным машинам.

Автором проведён анализ типов приводов для манипуляторов (таблица 1).

*Таблица 1*

| Параметр | Безколлекторный ДПТ | Коллекторный ДПТ | Шаговый двигатель | Синхронный двигатель с постоянными магнитами |
|---|---|---|---|---|
| Удельная мощность, Вт/кг | 100-250 | 80-150 | 40-90 | 120-250 |
| КПД | 85-93% | 70-80% | 60-75% | 88-95% |
| Пульсации момента | 2-8% (без компенсации) | Низкие | Высокие (резонанс) | <1% |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Требования к управлению | Среднее/сложное (FOC) | Простое (ШИМ) | Импульсно-фазовое | Сложное (FOC/DTC) |
| Надежность/ресурс | Высокий | Ограничен щётками | Высокий | Высокий |
| Стоимость | Средняя/высокая | Низкая | Низкая | Высокая |

Анализ данных таблицы демонстрирует, что бесколлекторные двигатели постоянного тока (*BLDC*) занимают промежуточное, но стратегически важное положение между дешевыми коллекторными машинами и премиальными сервоприводами на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами (*PMSM*). Отсутствие скользящего контакта в *BLDC* кардинально снижает тепловыделение в роторе и повышает перегрузочную способность, что критически важно для манипуляторов, работающих в повторно-кратковременных режимах.

Несмотря на то, что в русскоязычной технической литературе термин *BLDC* часто обобщают с *PMSM*, принципиальное различие кроется в конструкции магнитной системы и, как следствие, в форме противо-ЭДС. Автор акцентирует внимание на том, что классический *BLDC*-двигатель проектируется с трапецеидальным распределением магнитной индукции в зазоре. Это достигается специальной формой постоянных магнитов и конфигурацией обмоток статора (сосредоточенная обмотка). Данное решение позволяет использовать простой метод коммутации — 120-градусное или 150-градусное управление с обратной связью по положению ротора от дискретных датчиков Холла.

Однако в высокоточных манипуляционных системах все чаще применяется векторное управление (*FOC*), стирающее эксплуатационную грань между *BLDC* и *PMSM*. При синусоидальной коммутации *BLDC*-двигатель, изначально спроектированный под «трапецию», генерирует заметные гармонические искажения, вызывающие паразитные пульсации момента. Для робототехнических применений, таких как лазерная резка или микрохирургия, пульсации величиной 5–8% неприемлемы, так как они напрямую влияют на шероховатость обрабатываемой поверхности или точность позиционирования инструмента

Одним из ключевых критериев выбора привода для манипулятора является соотношение крутящего момента к объему и способность удерживать момент в статике без принудительного охлаждения. Коллекторные ДПТ в режиме удержания быстро перегреваются из-за протекания тока через якорь и щеточный узел. *BLDC*-двигатели, благодаря вынесению обмоток на статор, обладают значительно лучшим теплоотводом. Тепло отводится непосредственно на корпус манипулятора, что позволяет увеличить плотность тока на 20–30% по сравнению с коллекторными аналогами.

Моментная характеристика *BLDC* практически линейна во всем диапазоне скоростей. В отличие от шаговых приводов, у которых с ростом частоты вращения момент катастрофически падает из-за индуктивного

сопротивления обмоток, *BLDC* способны кратковременно развивать пиковый момент, в 2–3 раза превышающий номинальный. Это свойство незаменимо для обеспечения динамических рывков при сортировке объектов или компенсации инерционных нагрузок в кинематически разветвленных цепях манипуляторов типа «дельта-робот».

Сложность системы управления является сдерживающим фактором внедрения *BLDC* в бюджетных проектах. Тем не менее, развитие силовой микроэлектроники и появление интегрированных драйверов «*All-in-One*» нивелирует этот недостаток. Для реализации сложных алгоритмов, таких как бездатчиковое векторное управление по обратной ЭДС, требуются высокопроизводительные микроконтроллеры. Однако в робототехнических манипуляторах бездатчиковый метод применим лишь ограниченно — на скоростях, близких к нулевым, обратная ЭДС исчезает, и пуск без датчиков положения невозможен без инжекции высокочастотного сигнала, что создает акустический шум.

Поэтому в ответственных сочленениях манипуляторов, совершающих позиционные перемещения, сохраняется тенденция использования энкодеров или магнитных резольверов. Это делает *BLDC*-привод манипулятора полноценным сервоприводом, способным конкурировать с *PMSM* по плавности хода, но выигрывая в стоимости за счет более простой обработки сигналов с датчиков Холла на низких оборотах. Автор подчеркивает, что при частоте вращения до 3000 об/мин разница в эффективности между правильно настроенным *BLDC* (с трапецеидальной коммутацией) и *PMSM* (с синусоидальной) составляет не более 3–5%, тогда как стоимость контроллера для *BLDC* может быть ниже на 25–30%.

Проведенный анализ показывает, что бесщеточные электродвигатели постоянного тока являются на сегодняшний день оптимальным решением для исполнительных механизмов робототехнических манипуляторов среднего и тяжелого класса. Их использование позволяет устранить недостатки, связанные с механическим износом и низкой перегрузочной способностью. Дальнейшее развитие *BLDC*-приводов связано с разработкой новых магнитных материалов (*NdFeB*) и переходом на интегрированные «мотор-колеса» (тороидальные конструкции), где модуль управления встроен непосредственно в корпус двигателя. Это позволит унифицировать сочленения манипуляторов, сократить массогабаритные показатели коммутационных линий и реализовать концепцию децентрализованного управления осями с обменом данными по промышленному *Ethernet*-протоколу *EtherCAT*. Таким образом, несмотря на более высокую начальную стоимость по сравнению с коллекторными приводами, совокупная стоимость жизненного цикла (ТСО) манипулятора на базе *BLDC* существенно ниже за счет исключения простоев на замену щеток и повышения точности выполнения технологических операций.

**Библиографический список**

1. Баранов Н. А. Электроприводы робототехнических систем: учебное пособие / Н. А. Баранов. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 312 с.
2. Васильев А. С. Сравнительный анализ эффективности бесколлекторных и коллекторных двигателей в составе сервоприводов промышленных манипуляторов / А. С. Васильев, И. В. Петров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 5. – С. 234–242.
3. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение : учебное пособие / Ю. В. Подураев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Академия, 2020. – 288 с.

© Исхаков А.А., 2026

УДК 621.548

Л.Ю. ИШМУХАМЕТОВ
*iwp.lenar@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.В. ЛОБАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ РОТОРА ДАРЬЕ: АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ В БЫТОВОМ ПРИМЕНЕНИИ

*Аннотация.* В статье представлен анализ особенностей функционирования ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения, выполненных по схеме Жоржа Дарье, в быту. Проведено сопоставление эксплуатационных характеристик с горизонтально-осевыми аналогами, а также дана оценка целесообразности использования данного типа турбин в домашних условиях.

*Ключевые слова:* Ротор Дарье, ветрогенератор, ветроэнергетика, бытовая генерация, Вертикально-осевые ветроэнергетические установки, возобновляемые источники энергии, циклические нагрузки.

Вертикально-осевые ветроэнергетические установки (VAWT) привлекают внимание разработчиков и потребителей бытовых систем генерации благодаря своей способности воспринимать ветровой поток с любого направления без необходимости ориентации на ветер. Среди многообразия конструкций VAWT особое место занимает ротор, запатентованный французским инженером Жоржем Жаном Мари Дарье в 1931 году [2]. В отличие от роторов сопротивления (типа Савониуса), преобразующих кинетическую энергию за счет разницы лобового давления, турбина Дарье относится к классу подъемных

машин, использующих аэродинамическую силу, возникающую на лопасти при ее обтекании воздушным потоком. Данный принцип обеспечивает скорость лопастей, в 3–4 раза превышающую скорость набегающего потока. Это обеспечивает высокую быстроходность и, следовательно, высокую удельную мощность установки [2]. Однако, несмотря на очевидные теоретические преимущества, практическое применение роторов Дарье в бытовом сегменте сопряжено с рядом существенных технических и эксплуатационных сложностей, детальный анализ которых и является целью настоящей работы.

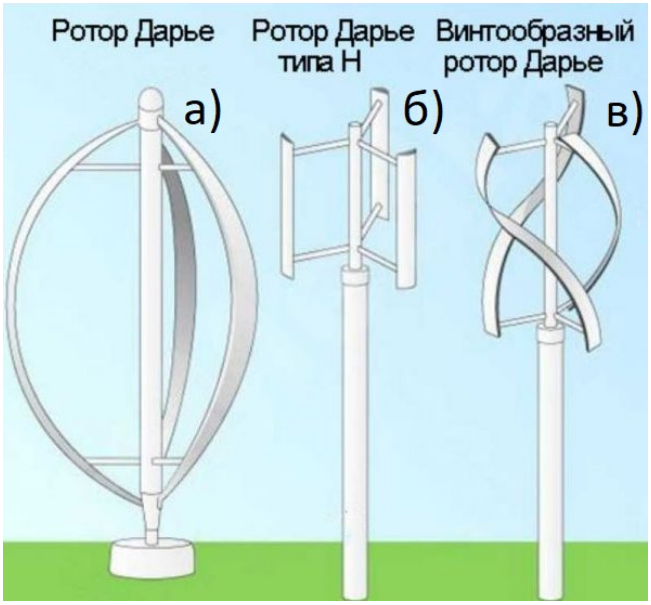



*Рис. 1.* Виды ветрогенераторов с ротором Дарье

Классический ротор Дарье (рисунок 1, а) представляет собой конструкцию с вертикальной осью вращения и изогнутыми лопастями (чаще всего в форме тропоскины – гибкой нити, вращающейся вокруг оси, или упрощенной дугообразной формы). В бытовых малых установках мощностью до 3–5 кВт также широко распространена Н-образная конфигурация (рисунок 1, б) (ротор Дарье-Джиромилла) с прямыми вертикальными лопастями, соединенными с валом посредством траверс. Аэродинамический механизм работы основан на циклическом изменении угла атаки и относительной скорости потока, набегающего на лопасть в процессе ее движения по окружности [3].

Наиболее часто упоминаемым преимуществом установок на базе ротора Дарье является их безразличность к направлению ветра. В условиях, характерных для высот установки бытовых ВЭУ (6–12 метров над уровнем земли), направление ветра подвержено частым и резким флуктуациям вследствие обтекания зданий, деревьев и элементов рельефа [1]. Горизонтально-осевые установки (HAWT) вынуждены постоянно отслеживать эти изменения с помощью флюгерного механизма или системы активного рыскания, что вносит задержку в реакцию системы и создает дополнительные динамические нагрузки на лопасти и башню, а также в целом усложняет

конструкцию. Ротор Дарье лишен этого недостатка, поскольку его аэродинамика безразлична к направлению набегающего потока. Кроме того, вертикальная компоновка позволяет разместить тяжелые элементы конструкции (генератор, мультипликатор, тормозную систему) на уровне земли или в непосредственной близости от основания мачты [1]. Это существенно упрощает монтажные работы, техническое обслуживание и ремонт, что является весомым аргументом для индивидуального пользователя, не располагающего специализированной грузоподъемной техникой. С точки зрения акустического воздействия, при корректно спроектированной геометрии лопастей и умеренной окружной скорости (до 40–50 м/с), ротор Дарье генерирует преимущественно низкочастотный аэродинамический шум [3], который субъективно воспринимается как менее раздражающий по сравнению с высокочастотным свистом лопастей быстроходных пропеллеров [2]. В условиях плотной жилой застройки это обстоятельство может иметь решающее значение при согласовании установки с соседями и местными административными органами.

Несмотря на перечисленные достоинства, массовое распространение роторов Дарье в бытовом секторе сдерживается рядом фундаментальных проблем. Существенным недостатком, проявляющимся именно в условиях бытовой эксплуатации, является высокий уровень циклических механических нагрузок. В процессе вращения каждая лопасть ротора Дарье дважды за оборот пересекает зону аэродинамической тени от центральной стойки и растяжек, а также испытывает резкие изменения угла атаки при прохождении наветренной и подветренной областей. Это приводит к возникновению пульсаций крутящего момента на валу и изгибных колебаний лопастей и траверс [3]. Если в промышленных установках с жестким креплением на мощном фундаменте эти вибрации демпфируются массивностью конструкции, то в легких бытовых ВЭУ, устанавливаемых на относительно тонких мачтах или крышах зданий, эти проблемы становятся особенно острыми. Их частичное решение достигается выполнением лопастей в форме винтовой спирали (рисунок 1, в) – для уменьшения эффекта пульсации крутящего момента на турбине за счет равномерного распределения крутящего момента по всей окружности [1]. Аспектом, ограничивающим эффективность роторов Дарье в бытовом применении, является их чувствительность к турбулентности и сдвигу ветра [3]. Идеальная работа турбины предполагает равномерный ламинарный поток, набегающий перпендикулярно оси вращения. В реальных условиях приземного слоя поток всегда нестабилен и характеризуется градиентом скорости по высоте. Для высоких горизонтально-осевых ветряков сдвиг ветра по диаметру ротора сравнительно невелик, тогда как для VAWT лопасть в верхней точке траектории может взаимодействовать с потоком, скорость которого на 20–30% выше, чем в нижней точке [3]. Данное рассогласование приводит к дополнительным потерям энергии и усугубляет дисбаланс аэродинамических сил, действующих на конструкцию.

Из представленных данных видно, что применение ротора Дарье в бытовом секторе на сегодняшний день ограничивается преимущественно нишевыми проектами и экспериментальными установками энтузиастов, в то время как коммерчески успешные продукты на их основе встречаются крайне редко. Вертикально-осевые ветротурбины типа Дарье обладают рядом неоспоримых достоинств, таких как независимость от направления ветра и удобство наземного обслуживания, что делает их привлекательными для бытового использования с точки зрения компоновки и интеграции в архитектурный облик строений. Однако глубокий анализ выявляет фундаментальные технические противоречия, связанные с аэродинамикой и высокими циклическими нагрузками, которые в условиях малых высот и турбулентной атмосферы существенно снижают реальную энергоэффективность и надежность конструкции. Для того чтобы ротор Дарье мог составить реальную конкуренцию горизонтально-осевым машинам в бытовом сегменте, необходимы дальнейшие исследования в области адаптивного управления углом атаки лопастей и разработки новых композитных материалов, способных длительно выдерживать нагрузки без накопления усталостных повреждений. В существующих же условиях типовой бытовой эксплуатации в текущем технологическом исполнении ограниченно применима и остается скорее объектом технического творчества, нежели серийным продуктом для массового потребителя.

## Библиографический список

1. Соломин Е.В. Сравнительные характеристики вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnye-harakteristiki-vertikalno-osevyh-vetroenergeticheskih-ustanovok/viewer (дата обращения 21.04.2026).

2. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие Р.В.Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев – Томск: Изд-во Томского политехнического университета,2009. – 113 с. [Электронный ресурс] URL: https://www.c-o-k.ru/library/document/12853/35746.pdf (дата обращения 21.04.2026).

3. Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17, № 3. — С. 323–332. (дата обращения 21.04.2026).

© Ишмухаметов Л.Ю., 2026

УДК 62–52:62–83

Д.И. КИЕКБАЕВ
*dinarkiek@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.Р. ФАРРАХОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА *S*-ОБРАЗНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

*Аннотация*. В данной статье рассматривается влияние ударных нагрузок на элементы электропривода и метод их подавления с помощью генератора *S*-образных траекторий. Показано, что формирование плавных законов движения позволяет минимизировать механические колебания и снизить пиковые электрические нагрузки.

*Ключевые слова*: генератор траектории; система управления; электропривод; ударные нагрузки; рывок.

## Введение

Электроприводы находят широкое применение в производственных и транспортных механизмах благодаря увеличению крутящего момента и компенсации инерции нагрузки, что позволяет наиболее эффективно использовать электродвигатели с меньшими массогабаритными показателями [1]. Однако входящие в их состав механические узлы, такие как редукторы, муфты и механизмы линейной передачи, подвержены ударным нагрузкам [2] и одновременно с этим являются источниками нежелательных вибраций, обусловленных несовершенством конструкции и особенностями эксплуатации. В частности, происходит возбуждение механического колебательного контура при резком приложении силы, причиной которого является износ элементов и наличие упругих деформаций в кинематических парах. В общем случае возникновение ударных нагрузок возникает из-за скачкообразного изменения ускорения, вызывающее пропорциональный скачок момента двигателя. Связь момента с темпом изменения скорости вращения задается основным уравнением движения электропривода:

$$M\text{-}M_c = J\frac{d\omega}{dt},$$

где M – вращающий момент приводного двигателя, $M_c$ – момент сопротивления исполнительного механизма, $J$ – приведённый момент инерции механической системы, $\frac{d\omega}{dt}$ – изменение угловой скорости вращения вала или угловое ускорение.

## 1. Характеристики движения

Для снижения ударных нагрузок в электрическом приводе реализуют управление ускорением с помощью рывка. Рывком называют первую

производную ускорения по времени или скорость его изменения [3]. Это понятие используется в областях, где резкое приращение ускорения и, как следствие, возрастание испытываемых нагрузок может негативно повлиять на устойчивость конструкций, точность позиционирования, вызвать деформацию тела и преждевременный выход инструмента из строя.

Ограничение рывка можно реализовать с помощью системы автоматического управления задающего устройства, именуемого генератором траектории. В нем формируются задания на изменения основных кинематических характеристик движения электропривода, перечисленных в таблице 1.

*Таблица 1*

Кинематические характеристики движения

| Характеристики | Обозначение | Интегральная форма | Дифференциальная форма |
|---|---|---|---|
| Положение, м | $x$ | $x=\int vdt$ | – |
| Скорость, м/с | $v$ | $v=\int adt$ | $v=\frac{dx}{dt}$ |
| Ускорение, м/с$^2$ | $a$ | $a=\int \rho dt$ | $a=\frac{dv}{dt}$ |
| Рывок, м/с$^3$ | $\rho$ | – | $\rho=\frac{da}{dt}$ |

## 2. Результаты моделирования

В отличие от традиционного линейного управления, где движение задается непосредственно сигналом ускорения, *S*-образное управление генерирует сигналы рывка, посредством чего уменьшается темп изменения ускорения и скорости. Различие двух типов управления иллюстрируется на рисунках 1 и 2.

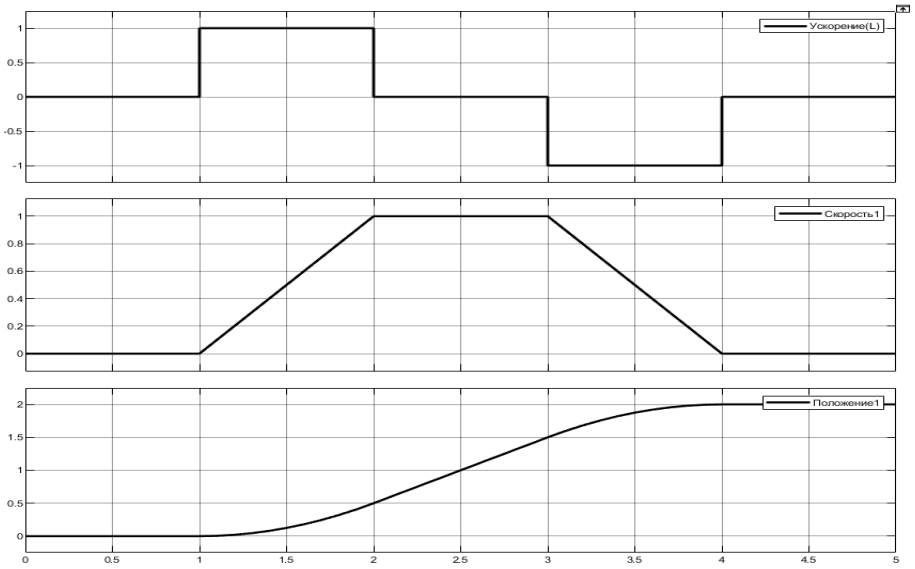



*Рис. 1.* Графики линейного управления при ступенчатом воздействии на ускорение

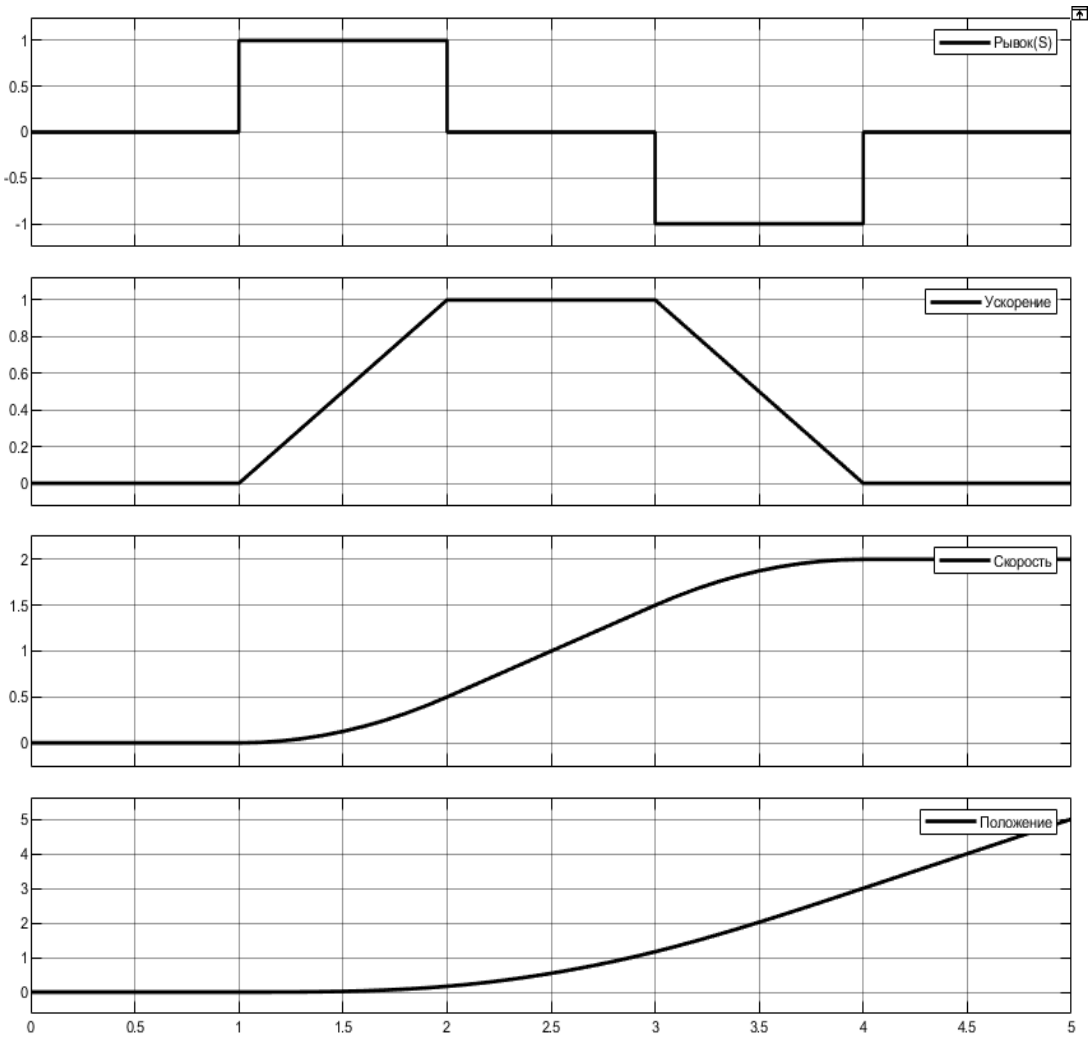



*Рис. 2.* Графики *S*-образного управления при ступенчатом воздействии на рывок

Из графиков следует, что при воздействии на функцию высшего порядка каждая последующая производная приобретает более сглаженную форму, благодаря чему изменение ускорения и скорости происходит плавнее. При линейном управлении кривая положения состоит из линейных и параболических участков, вследствие чего в моменты разгона или торможения на элементы механизма будут оказываться толчки. При *S*-образном управлении график положения состоит исключительно из участков парабол вторых и третьих степеней, что придает кривой характерную *S*-образную форму. Благодаря этому механизмы будут испытывать значительно меньшие пиковые нагрузки при разгоне или торможении [4].

Помимо вышесказанного, генератор траектории способствует снижению скачков напряжения и тока в силовых цепях, продлевая срок службы системы управления. Обусловлено это тем, что ток является одной из величин, от которой зависит электромагнитный момент двигателя. Плавное формирование момента, достигаемое за счет ограничения рывка, ограничивает и темп нарастания тока.

**Заключение**

Таким образом, применение генератора *S*-образных траекторий обеспечивает ограничение ударных нагрузок в механических узлах электропривода, защищает двигатель и систему управления от токовых перегрузок и перенапряжений, а также подавляет нежелательную вибрацию благодаря уменьшению мгновенных приращений ускорения и скорости посредством управления рывком.

**Библиографический список**

1. Gearboxes vs Direct Drive Motors in Motion Control. [Электронный ресурс] URL: https://anaheimautomation.com/blog/post/gearboxes-vs-direct-drive-motors-when-to-use-each-in-motion-control-systems (дата обращения: 29.04.2026).

2. Гасияров В.Р. Способ компенсации динамических нагрузок электропривода прокатной клети за счет опережающего увеличения скорости // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 39-46. [Электронный ресурс] URL: https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-39-46 (дата обращения: 29.04.2026).

3. Рывок (кинематика). [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Рывок_%28кинематика%29 (дата обращения: 29.04.2026).

4. S-образный профиль разгона и торможения электропривода. [Электронный ресурс] URL: https://www.cospa.ru/news/publications/s-obraznyy-profil-razgona-i-tormozheniya-elektroprivoda (дата обращения: 29.04.2026).

© Киекбаев Д.И., 2026

УДК 621.313.333

Р.С. КИРИЛЛОВ
*krs2808@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: ИЗОЛЯЦИЯ, ПРОВОДА И КОНСТРУКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ

*Аннотация*. В статье приводится обзор современных материалов, используемых при производстве асинхронных двигателей. Рассмотрены классы нагревостойкости изоляции *F*, *H*, *C*, термостойкие эмальпровода серии ПЭТВ, системы изоляции высоковольтных машин на основе слюдосодержащих лент. Проанализированы свойства литого алюминия для короткозамкнутого ротора,

альтернативные применения медной обмотки ротора, а также перспективные материалы.

*Ключевые слова*: асинхронный двигатель, изоляционные материалы, класс нагревостойкости *F*, обмоточные провода ПЭТВ, литой алюминиевый ротор, короткозамкнутый ротор, нанокомпозитная изоляция, стойкость к частичным разрядам.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором остаются наиболее распространенными электрическими машинами в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте. Их надежность, относительная простота конструкции и технологичность обеспечивают стабильный спрос. Однако в последние годы к электрическим машинам предъявляются все более высокие требования по энергоэффективности, массогабаритным показателям, ресурсу и условиям эксплуатации. Удовлетворение этих требований невозможно без применения новых материалов.

Прогресс в материаловедении позволяет создавать изоляционные системы с более высокой нагревостойкостью и электрической прочностью, обмоточные провода с улучшенными тепловыми и механическими характеристиками, конструкционные сплавы с повышенной проводимостью и прочностью. Цель данной работы - систематизировать сведения о ключевых материалах, применяемых в современных асинхронных двигателях, и наметить перспективные направления развития.

**1. Изоляционные системы: классы нагревостойкости**

Температура — главный фактор, определяющий срок службы изоляции. В зависимости от максимально допустимой температуры нагрева изоляционные материалы делятся на классы нагревостойкости. Наиболее распространены классы нагревостойкости *B* (130°C), *F* (155°C) и *H* (180°C). Класс *F* стал стандартом для большинства асинхронных двигателей общего назначения, предлагая оптимальный баланс между надежностью и стоимостью, а для тяжелых условий эксплуатации (например, тяговые двигатели) применяют класс *H* (180°C) и даже класс *C* (свыше 180°C).

Применение синтетических изоляционных материалов классов нагревостойкости *B* и *F* позволило уменьшить толщину корпусной изоляции в 1,2–1,4 раза и довести коэффициент заполнения паза медью до 50%, что напрямую повышает мощность двигателя при тех же габаритах.

**2. Обмоточные провода: от ПЭТВ до термостойких эмалей**

Обмоточные провода составляют основу проводниковой системы двигателя. Для асинхронных двигателей общего назначения широко применяются эмальпровода типа ПЭТВ - Провод с Эмалированной изоляцией Термостойкий, Высокопрочный. В качестве изоляции используется полиэфирный лак, обеспечивающий класс нагревостойкости *B* (130°C). Для условий с более высокими температурами разработаны провода с термостойкой

эмалью на полиимидной основе, выдерживающие до 200–240°C, а также фторопластовые изоляции для агрессивных сред. В криогенных двигателях (например, погружных насосах для жидкого азота) применяют специальные обмоточные и монтажные провода, сохраняющие работоспособность при сверхнизких температурах.

**3. Современные изоляционные системы для тяжелых условий**

Для высоковольтных машин и двигателей, работающих в тяжелых условиях (тяговые, компрессорные), используются сложные системы изоляции на основе слюдосодержащих лент. Например, стеклослюдолента ЛСКН 135 ТПл применяется для корпусной изоляции в системах классов нагревостойкости *B* (130°C) и *F* (155°C) по технологии вакуумно-нагнетательной пропитки. Выпускаются комплексы материалов, рассчитанные на классы нагревостойкости *H*, *F* и *C*, основой для которых служат стеклослюдосодержащие ленты, включая варианты с полиэтилентерефталатной пленкой.

Особого внимания заслуживает изоляция, стойкая к частичным разрядам (ПР), необходимое условие для двигателей, питающихся от преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Повторяющиеся импульсные перенапряжения от ШИМ-преобразователей вызывают интенсивные частичные разряды в изоляции, что резко сокращает ее ресурс. Для оценки таких систем разработаны стандарты IEC 60034-18-42, определяющие квалификационные испытания. Частичные разряды - одна из основных причин преждевременного выхода из строя двигателей с частотным регулированием, поэтому проблема создания стойкой к ПР изоляции чрезвычайно актуальна.

**4. Материалы ротора: литой алюминий и медные обмотки**

Наиболее технологичным и распространенным способом изготовления короткозамкнутого ротора является литье алюминия под давлением. Пакет ротора собирают из листов электротехнической стали, а затем в специальной форме заливают расплавленным алюминием, который заполняет пазы и формирует короткозамыкающие кольца. Преимущества литого алюминия - малая плотность (облегчение ротора и снижение инерции), высокая технологичность и коррозионная стойкость.

Однако алюминий имеет меньшее удельное сопротивление, чем медь, что увеличивает потери в обмотке ротора. Альтернатива - применение литой медной обмотки ротора. Медные роторы обладают значительно меньшими электрическими потерями, что позволяет повысить КПД двигателя, особенно в высокоскоростных и мощных машинах. Технология литья меди сложнее из-за более высокой температуры плавления, но ее применение оправдано в двигателях классов энергоэффективности IE3, IE4 и выше.

**5. Перспективные материалы и технологии**

Развитие нанотехнологий открывает новые возможности. Нанокомпозитная изоляция представляет собой полимерную матрицу с равномерно диспергированными наночастицами (нанокремнезем, наноглина). Такие композиты могут иметь теплопроводность более 0,8 Вт/м·К, диэлектрическую проницаемость ниже 5 и тангенс угла диэлектрических потерь менее 3%, что существенно повышает надежность изоляции и отвод тепла от обмоток.

Еще одно перспективное направление – применение аморфных и нанокристаллических электротехнических сталей для магнитопроводов. Потери в аморфной стали в несколько раз ниже, чем в традиционной электротехнической стали, что позволяет создавать двигатели сверхвысоких классов энергоэффективности, особенно для высокоскоростных машин. Тем не менее, высокая стоимость и сложность штамповки сдерживают их широкое внедрение.

**Заключение**

Выбор материалов для асинхронного двигателя – это комплексная задача, требующая учета электрических, тепловых, механических и экономических факторов. Современный уровень развития материаловедения предлагает широкий спектр решений: от апробированных эмальпроводов ПЭТВ и изоляции класса *F* до новых технологий – нанокомпозитной изоляции, аморфной стали и роторов с медной литой обмоткой. Правильный выбор материала позволяет не только повысить номинальные характеристики двигателя, но и значительно увеличить его ресурс, надежность и энергоэффективность – именно то, что определяет конкурентоспособность любого электропривода.

**Библиографический список**

1. Электронный каталог. Шагалов, С. Б. Системы изоляции классов нагревостойкости F, H и C на основе новых материалов для электрических машин с тяжелыми условиями эксплуатации / С. Б. Шагалов. – Москва: Информэлектро, 1975.

2. Классы нагревостойкости электрической изоляции: Y, A, E, B, F, H, C. – ETI.su, 2025. – URL: https://eti.su (дата обращения: 03.04.2026).

3. Сравнение систем электрической изоляции тяговых электродвигателей. – Изолит-ЕКБ, 2024. – URL: https://izolitekb.ru (дата обращения: 03.04.2026).

4. Характеристики проводов ПЭТВ-2 и ПЭТ-155. – neznn.ru, 2025. – URL: https://neznn.ru (дата обращения: 05.04.2026).

5. Провода обмоточные специальные. – m-teh.com.ua.

6. Слюдолента ЛСКН 135 ТПл. – Солнечный Ветер, 2024. – URL: https://sunny-wind.by.

7. Введение. – studfile.net.

8. Экспериментальные исследования асинхронного электродвигателя с криогенным охлаждением. – MPEI, 2023. – URL: https://electricity.mpei.ru (дата обращения: 13.04.2026).

© Кириллов Р.С., 2026

УДК 621.3.04

И.А. КОЖУХ
*kozhukhivan2@gmail.com*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Е.А. ПОЛИХАЧ

***Уфимский университет науки и технологий***

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВОДОВ КОМПРЕССОРОВ

*Аннотация.* Автором проведен обзор научно-технической литературы, рассмотрена классификация компрессоров и выполнен сравнительный анализ различных типов синхронных двигателей, применяемых в их приводах. Выявлены преимущества и особенности использования синхронных машин.

*Ключевые слова:* синхронный двигатель, привод компрессора, энергоэффективность, классификация компрессоров.

В современном мире синхронные двигатели (СД) являются неотъемлемой частью нашей жизни и компрессоры не являются исключением, благодаря своей стабильной работе и высокой энергоэффективности. Большое количество компаний [АЭМЗ (Астраханский электромеханический завод), НПП ”Электродвигатель” и другие] в Российской Федерации занимаются производством синхронных двигателей приводов компрессоров. Это делает рассматриваемую тему исследования актуальной в нынешнее время.

Статор у синхронного двигателя выполнен в тороидальном виде с расположенной m-фазной спиральной обмоткой, ротор же состоит из 2-х зубчатых дисков с постоянными магнитами, которые находятся на оси между дисками.

Предметом исследования является синхронный двигатель привода компрессора. Рассмотрим классификацию компрессоров Рис. 13).

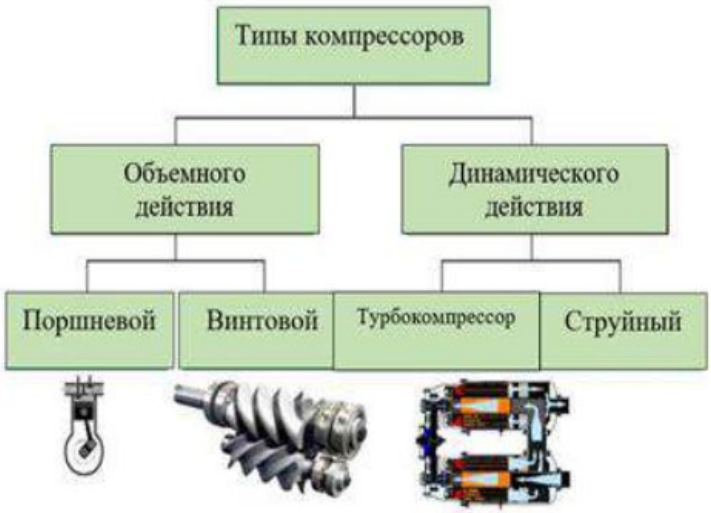



*Рис. 13.* Классификация компрессоров

Синхронные двигатели широко применяются в приводах компрессорного оборудования благодаря способности поддерживать постоянную скорость вращения независимо от нагрузки, высокому коэффициенту полезного действия и возможности работы с улучшенным коэффициентом мощности.

В зависимости от конструкции ротора в синхронных двигателях подразделяются на явнополюсные и неявнополюсные. Явнополюсные машины чаще используются в низко и среднескоростных приводах крупных поршневых и центробежных компрессоров, для них требуется высокий пусковой момент и возможность регулирования возбуждения. Неявнополюсные же роторы характерны для высокоскоростных применений.

Отдельную группу составляют синхронные двигатели с постоянными магнитами (ПМД)Рис. 14). Они отличаются компактностью, высоким КПД (до 95–97 %) и отсутствием потерь на возбуждение, что особенно выгодно для винтовых и спиральных компрессоров средней мощности.

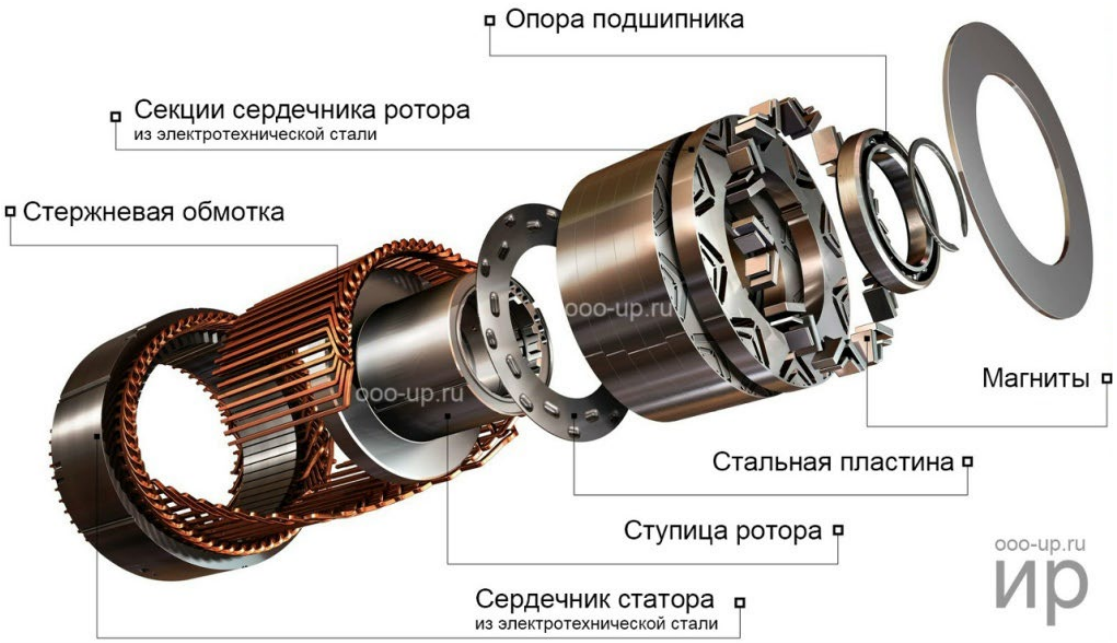



*Рис. 14.* Конструкция синхронного двигателя с постоянными магнитами

Сравнение синхронных и асинхронных двигателей показывает заметные преимущества первых в компрессорных установках (таблица 1). При одинаковых габаритах синхронные машины развивают большую мощность. Они не снижают обороты при росте нагрузки, имеют более высокий КПД и могут работать в режиме перевозбуждения. Это снижает общие потери электроэнергии на предприятии.

Однако синхронные двигатели сложнее в пуске и требуют дополнительных устройств (асинхронная пусковая обмотка на роторе или частотные преобразователи).

*Таблица 1*

Сравнительные характеристики синхронных и асинхронных двигателей

| **Параметр** | **Синхронный двигатель** | **Асинхронный двигатель** |
|---|---|---|
| Скорость вращения | Постоянная | Скольжение (зависит от нагрузки) |
| КПД | Достигает 97% | 75-90% |
| Сложность пуска | Требует специальные устройства | Простой |
| Коэффициент мощности | Регулируемый (cos□=1) | □1 |
| Применение в компрессорах | Предпочтительно для мощных | Для малой и средних мощностей |

В нефтегазовой, химической и холодильной промышленности предпочтение часто отдается специализированным компрессорным сериям синхронных двигателей типа синхронный двигатель компрессорный (СДК) Рис. 15), синхронный двигатель с коробкой поршневых компрессоров (СДКП2). Они рассчитаны на продолжительный режим работы, в том числе во взрывоопасных зонах.

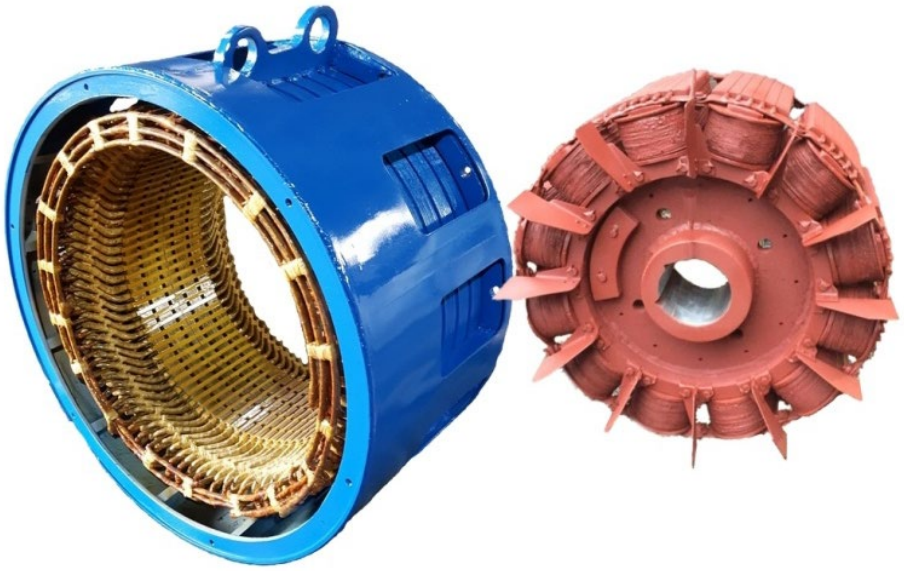


*Рис. 15.* Синхронный двигатель серии СДК в компрессорной установке

Для повышения эффективности приводов современных компрессоров активно внедряются системы частотного регулирования скорости в сочетании с синхронными двигателями с постоянными магнитами. Такой подход позволяет оптимизировать энергопотребление в зависимости от требуемой производительности.

Таким образом, выбор типа синхронного двигателя для привода компрессора нужно учитывать: мощность установки, режим ее работы, требования к точности поддержания скорости и экономические показатели. Правильный подбор позволяет существенно повысить энергоэффективность и надежность компрессорного оборудования в целом.

**Библиографический список**

1. Виды приводов для компрессионной техники. [Электронный ресурс] URL: https://compressorgroup.ru/info/articles/vidy_privodov_dlya_kompressionnoy_tekhniki/ (дата обращения 01.05.2026).

2. Выбор электродвигателя для компрессора. [Электронный ресурс] URL: https://tehprivod.su/poleznaya-informatsiya/vybor-elektrodvigatelya-dlya-kompressora.html (дата обращения 02.05.2026).

3. Синхронные электродвигатели: особенности, достоинства и недостатки. [Электронный ресурс] URL: https://www.nporusgidro.com/blog/elektrodvigateli/sinkhronnye-elektrodvigateli-osobennosti-dostoinstva-i-nedostatki/ (дата обращения 01.05.2026).

© Кожух И.А., 2026

УДК 004.046

Н.С. КУДРЯВЦЕВ
*xzikyrx@mail.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Т.А. ВОЛКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## РОССИЙСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

*Аннотация.* В статье анализируются российские программные обеспечения для проектирования.

*Ключевые слова:* nanoCAD, продукты ModelStudio CS, коллизии.

NanoCAD – это российское программное обеспечение (ПО), которое предназначено для создания и редактирования 2D-чертежей и 3D-моделей. Актуальность применения данной системы автоматического проектирования (САПР) в наше время обусловлена такими факторами как [1-5]:

- переход к отечественному;
- экономическая необходимость;
- независимость от зарубежных производителей;
- совместимость с другими ПО.

Данное программное обеспечение совместимо с другими популярными система автоматического проектирования, одним из которых является ModelStudio CS.

ModelStudio CS – это российская комплексная BIM-система для информационного моделирования и трехмерного проектирования объектов промышленного и гражданского строительства (в том числе и в области электроэнергетики) [4, 6]. У данного программного обеспечения имеются различные продукты (рисунок 1).

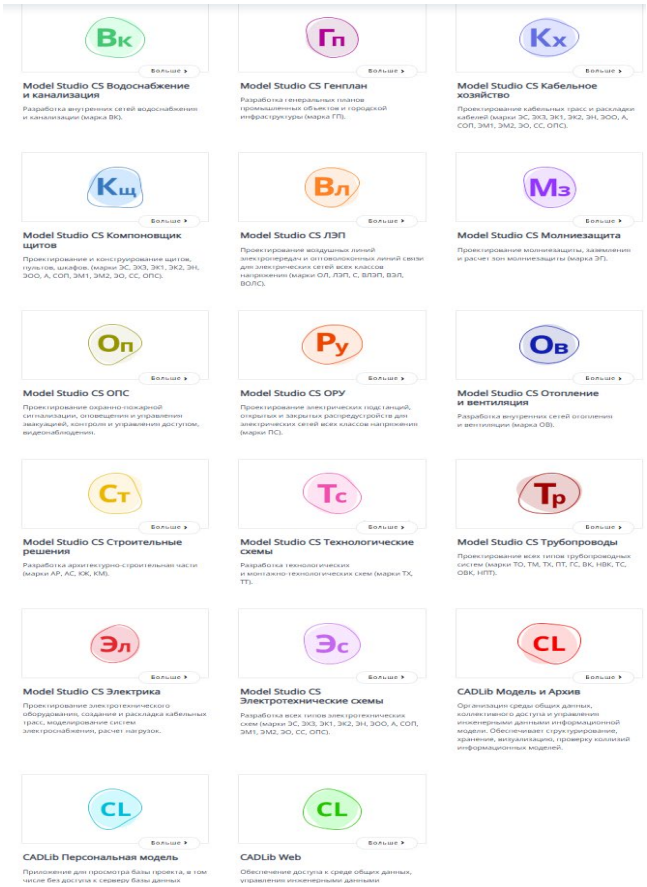



*Рис. 1.* Различные продукты ModelStudio CS [5]

Данные дополнения ускоряют и помогают процессу проектирования. Рассмотрим на конкретных продуктах преимущества и недостатки. С помощью ModelStudio CS ОРУ мы можем построить 3D модели станций, подстанций или других электроэнергетических объектов, а также отдельные их элементы (трансформаторы, разъединители, выключатели и другие (рисунок 2)).

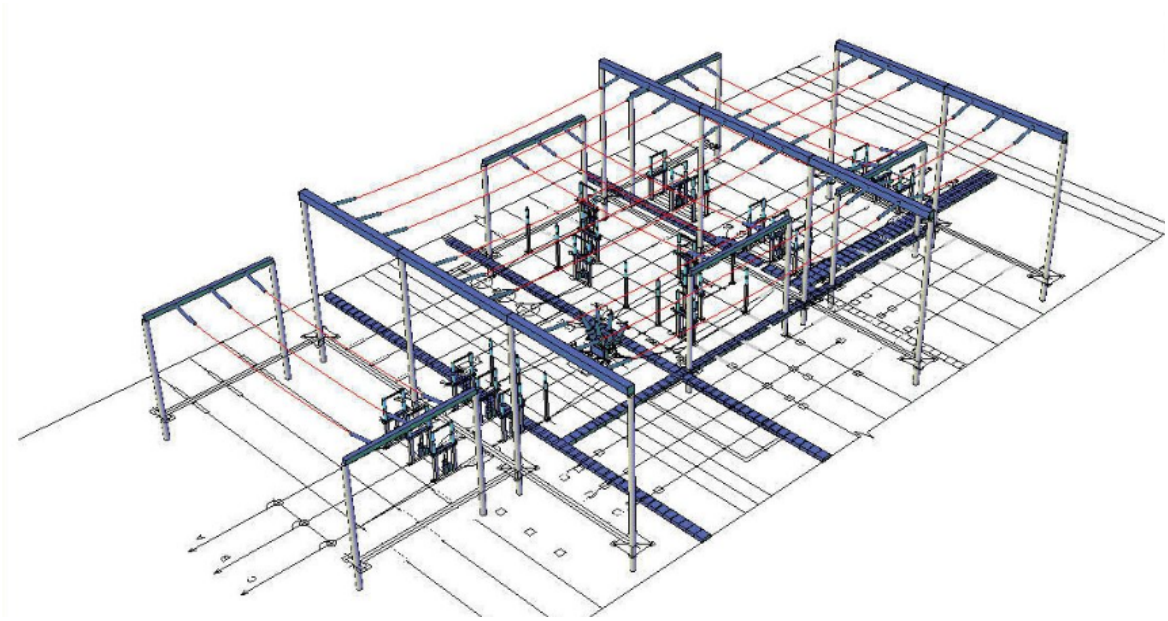


*Рис. 2.* Модель ОРУ в ModelStudio CS [7]

С помощью ModelStudio CS кабельное хозяйство мы можем проложить лотки, кабели для всех систем (наружных и внутренних) в реалистичном виде и посмотреть действительную загрузку лотков (это позволяет определить хватит ли места для всех кабелей), а также можем задать кабели нужными сечениями (рисунок 3-4).

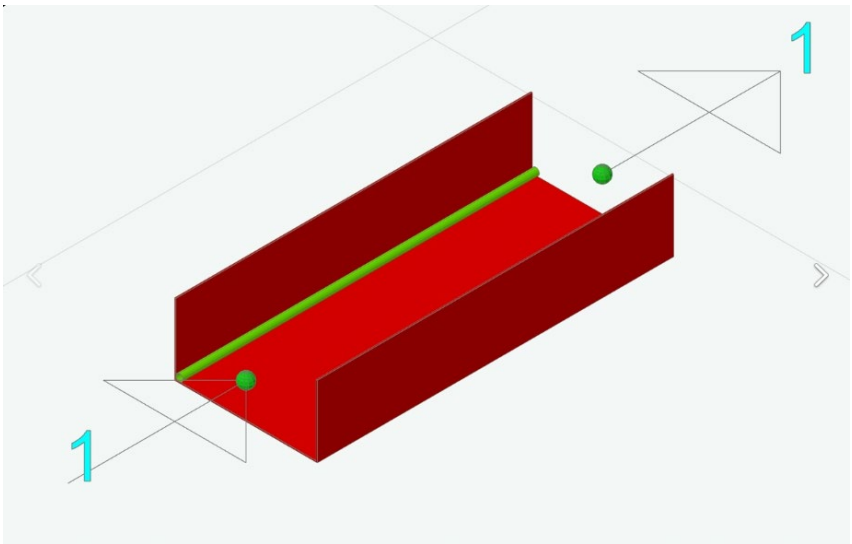



*Рис. 3.* Прокладка кабеля по лотку в ModelStudio CS

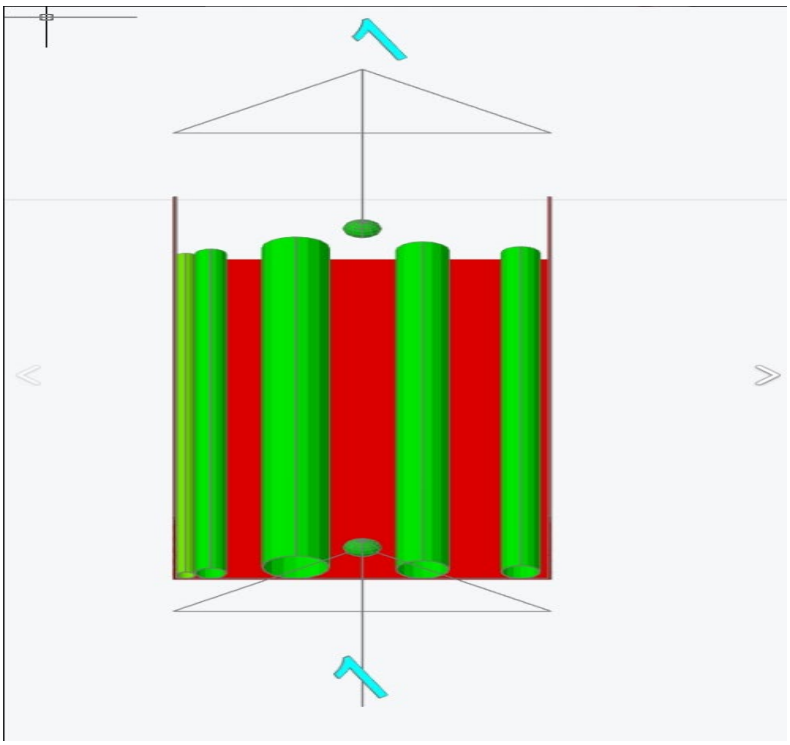


*Рис. 4.* Прокладка кабеля различными сечениями по лотку в ModelStudio CS

Основными преимуществами являются возможности визуализации, отслеживания всех этапов постройки элемента и обнаружения коллизии (рисунок 5).

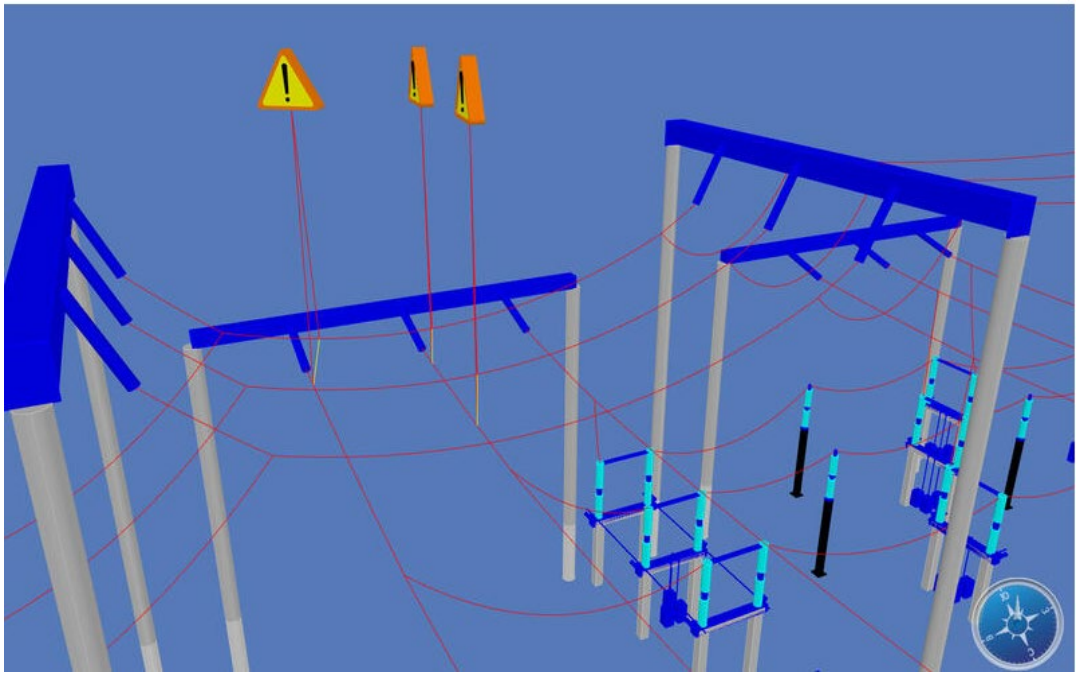


*Рис. 5.* Обнаружение коллизий в ModelStudio CS [8]

К недостаткам относится маленькая база элементов, которую необходимо дополнять (запрашивать у производителей оборудование или отрисовывать самому (рисунок 6)) [8].

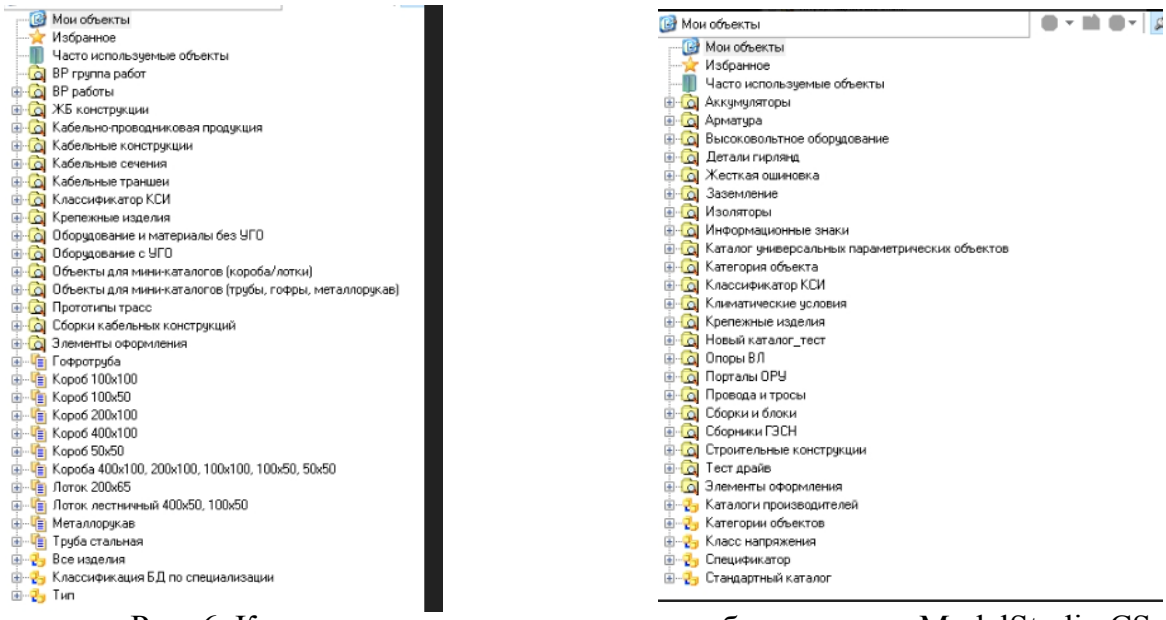



Рис. 6. Каталог стандартных элементов базы данных ModelStudio CS

Данный продукт отлично подходит для внедрения в учебные заведения для обучения основам проектирования. С помощью данного ПО преподаватели смогут обучить на первоначальном этапе и в дальнейшем студентам будет проще трудоустроиться и разбираться с функционалом отечественного софта.

## Библиографический список

1. Габидулин В.М. Основы работы в nanoCAD / под ред. Азанова М. – М.: ДМК Пресс, 2018 – 176 с.: ил.

2. Полещук Н.Н. Путь к nanoCAD. – СПБ.: БХВ-Петербург, 2017. – 365 с.: ил.

3. Хейфец, Александр Лькович Инженерная 3D-компьютерная графика. Платформа nanoCAD: учебник для академического бакалавриата / А. Л. Хейфец. – 3-е изд., эл. – 1 файл pdf: 305 с. – Москва: ДМК Пресс, 2025.

4. Кудрявцев, Н. С. Обзор технологий информационного моделирования объектов энергетики / Н. С. Кудрявцев // Мавлютовские чтения: Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года. Том 3. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 376-379. – EDN CNUKRW.

5. Что такое nanoCAD? // URL: https://www.nanocad.ru/.

6. Что такое ModelStudio? // URL: https://modelstudiocs.ru/programs/.

7. Рисунок ОРУ // URL: https://bimacad.ru/produkty/model-studio-cs-otkrytye-raspredelitelnye-ustrojstva/.

8. Пример коллизий // URL: https://csdev.ru/articles/cm_90_14.html.

© Кудрявцев Н.С., 2026

УДК 621.313

Н.С. МАКАРОВ
*fhumanbrain@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Т.Р. ТЕРЕГУЛОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛЕГКОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО САМОЛЕТА

*Аннотация*. В работе сравнительный анализ эффективности гибридных силовых установок (ГСУ) последовательной схемы на базе трёх типов тепловых двигателей — поршневого ДВС, турбовального ГТД и ультрамикро-ГТД — для лёгкого многоцелевого самолёта. По критериям топливной эффективности, массы и стоимости показано, что для полётов продолжительностью 2–4 часа наиболее рациональным решением является ГСУ на базе поршневого ДВС.

*Ключевые слова*: легкий самолет, гибридная силовая установка, поршневой двигатель, турбовальный двигатель, микро-ГТД, последовательная схема, топливная эффективность.

В настоящее время авиационная промышленность находится в стадии активного поиска технологических решений, направленных на снижение расхода топлива, уменьшение вредных выбросов и снижение акустического воздействия летательных аппаратов. Особую актуальность эта задача приобретает в сегменте легкой и учебно-тренировочной авиации, где эксплуатируются десятки тысяч воздушных судов, оснащенных поршневыми двигателями с высоким удельным расходом топлива.

Согласно исследованиям Центрального института авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), двигатели для легких самолетов выбираются из условия обеспечения взлета и обладают значительным запасом мощности для крейсерского режима полета, следствием чего является повышенный удельный расход топлива. Использование гибридной силовой установки позволяет устранить это противоречие: тепловой двигатель оптимизируется под крейсерский режим, а недостающая мощность на взлете компенсируется за счет аккумуляторных батарей и электромоторов.

В Московском авиационном институте (МАИ) защищена диссертация на тему «Формирование облика авиационной гибридной силовой установки на базе поршневого и электрического двигателей для лёгкого самолёта», что подтверждает высокую научную и практическую значимость данного направления.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ трех типов тепловых двигателей, которые могут быть использованы в качестве первичного источника энергии в составе последовательной ГСУ легкого самолета: поршневой ДВС, турбовальный ГТД (ТВГТД) и малоразмерный ГТД (микро-ГТД).

**Архитектура ГСУ и сравниваемые типы двигателей**

Для легкого самолета наиболее целесообразной является последовательная схема ГСУ, при которой тепловой двигатель приводит во вращение только электрический генератор, а воздушный винт вращается электромотором, питаемым от генератора и буферной аккумуляторной батареи. Данная схема позволяет вывести тепловой двигатель в точку оптимального удельного расхода топлива и поддерживать этот режим на протяжении всего крейсерского полета. На рисунке 1 изображена обобщенная схема архитектуры ГСУ.

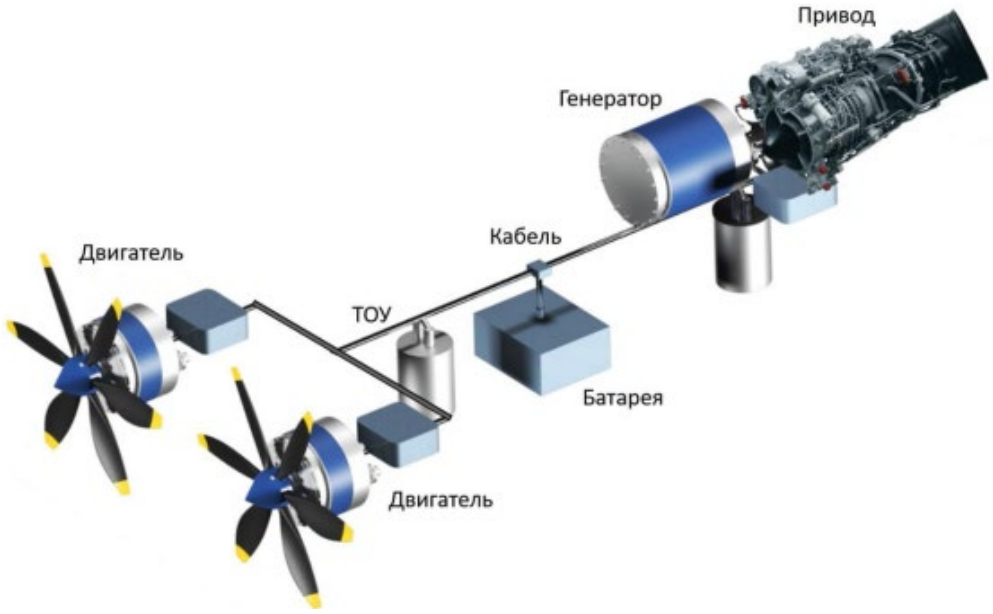



*Рис. 1.* Обобщённая схема архитектуры ГСУ

В качестве первичного источника энергии рассмотрены три типа тепловых двигателей:

1. Поршневой ДВС (авиационный) – традиционный двигатель для легкой авиации (Rotax 912/915, Continental, Lycoming). Отличается низким удельным расходом топлива и невысокой стоимостью, но имеет значительную удельную массу.

2. Турбовальный ГТД (ТВГТД) – газотурбинный двигатель, оптимизированный для привода генератора. Исследования ЦИАМ показывают перспективность данной схемы для самолетов местных воздушных линий вместимостью до 19 пассажиров.

3. Малоразмерный ГТД (микро-ГТД) – компактный газотурбинный двигатель мощностью 50–150 кВт. Согласно исследованиям Уфимского университета науки и технологий, ультрамикрогазотурбинные двигатели

рассматриваются как перспективный источник энергии для гибридных силовых установок беспилотных летательных аппаратов.

**Сравнительный анализ характеристик тепловых двигателей**

В таблице 1 приведено сравнение ключевых характеристик трех типов тепловых двигателей применительно к классу мощности 80–150 кВт, характерному для легких самолетов.

*Таблица 1*

Сравнение характеристик тепловых двигателей для ГСУ

| Параметр | Поршневой ДВС | ТурбовальныйГТД | Ультрамикро-ГТД |
|---|---|---|---|
| Удельный эффективный расход топлива $g_e/г$, г/(кВт*ч) | 240-280 | 320-380 | 450-600 |
| Удельная мощность двигателя $\gamma дв$, кг/кВт | 0,80-0,90 | 0,44-0,45 | 0,55-0,70 |
| Ресурс до капитального ремонта,ч | 2000 | 3000 | 500-1000 |
| Относительная стоимость | 1 | 3,0-4,0 | 1,5-2,0 |

Анализ таблицы 1 позволяет сделать следующие выводы:

1. По топливной экономичности поршневой ДВС имеет неоспоримое преимущество: его удельный расход топлива на 25–30% ниже, чем у ТВГТД, и почти вдвое ниже, чем у микро-ГТД. Это означает, что при одинаковой продолжительности полета масса топлива для ГСУ с ДВС будет минимальной.

2. По удельной массе лидирует турбовальный ГТД - он почти вдвое легче поршневого ДВС. Однако этот выигрыш частично нивелируется необходимостью установки более мощного генератора и редуктора для согласования частот вращения.

3. По ресурсу и стоимости поршневой ДВС является наиболее привлекательным вариантом. Его стоимость в 3-4 раза ниже, чем у ТВГТД, а межремонтный ресурс достигает 2000 часов.

4. По уровню шума и тепловой заметности поршневой ДВС также предпочтительнее газотурбинных аналогов, что особенно важно для учебно-тренировочных самолетов, эксплуатирующихся вблизи населенных пунктов.

**Оценка суммарной массы ГСУ**

Для количественного сравнения выполнена оценка суммарной массы силовой установки МСУ (двигатель + генератор + топливо на 3 часа полета) для легкого самолета с крейсерской мощностью $N$кр = 90 кВт.

Как видно из табл. 2, ГСУ на базе поршневого ДВС и ТВГТД имеют близкую суммарную массу (различие ~6%). Однако с учетом стоимости и ресурса поршневой ДВС является более рациональным выбором для гражданской легкой авиации.

*Таблица 2*

Сравнение суммарной массы ГСУ (3 часа полета)

| Компонент | ГСУ-ПД (поршневой) | ГСУ-ТВГТД | ГСУ-МикроГТД |
|---|---|---|---|
| Масса двигателя, кг | 80 | 45 | 55 |
| Масса генератора, кг | 25 | 25 | 25 |
| Масса топлива(3ч),кг | 68 | 92 | 135 |
| Суммарная масса | 173 | 162 | 215 |

**Практические примеры реализации**

Практическая реализуемость ГСУ на базе поршневого ДВС подтверждается реальными проектами. Французская компания VoltAero представила гибридный силовой агрегат HPU 210, сочетающий 150-киловаттный поршневой двигатель Kawasaki Ninja H2 SX с 60-киловаттным электромотором. Система обеспечивает 40-процентное увеличение мощности на взлете и наборе высоты, снижение расхода топлива в крейсерском режиме до 38 литров в час и заявленный межремонтный ресурс 1500 часов. Первые поставки заказчикам запланированы на конец 2026 года.

В Московском авиационном институте ведутся работы по созданию гибридной силовой установки для беспилотников грузоподъемностью более 500 кг и пилотируемых воздушных судов с вертикальным взлетом и посадкой. Это свидетельствует о высоком уровне отечественных компетенций в данной области.

В ЦАГИ проведены экспериментальные исследования влияния отказа двигателя на аэродинамические характеристики модели легкого транспортного самолета с гибридной силовой установкой. Показано, что использование электрической трансмиссии между работающим и отказавшим двигателем позволяет кратковременно поддерживать безопасный режим полета в аварийной ситуации.

**Заключение**

Проведенный сравнительный анализ показывает, что для легкого многоцелевого самолета с характерной продолжительностью полета 2-4 часа гибридная силовая установка последовательной схемы на базе поршневого ДВС является наиболее рациональным техническим решением по совокупности критериев «топливная эффективность – масса – стоимость – ресурс».

Турбовальный ГТД обеспечивает выигрыш по массе, но его применение в легкой авиации ограничено высокой стоимостью (в 3-4 раза выше поршневого ДВС) и повышенным расходом топлива. Микро-ГТД проигрывает по топливной экономичности и ресурсу, что делает его неоптимальным для длительных полетов.

Практическая реализуемость ГСУ на базе поршневого ДВС подтверждается проектами ведущих мировых разработчиков (VoltAero HPU 210) и активными исследованиями в российских научных центрах (МАИ,

ЦАГИ). Дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение массы электрических компонентов и разработку нормативной базы для сертификации ГСУ легких воздушных судов.

**Библиографический список**

1. ЦИАМ представил облик гибридной силовой установки для пассажирских самолетов [Электронный ресурс] // АвиаПорт. – URL: http://www.aviaport.ru/news/563317/ (дата обращения: 13.04.2026).

2. Сычёв А.В. Формирование облика авиационной гибридной силовой установки на базе поршневого и электрического двигателей для лёгкого самолёта: автореф. дис. … канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2024. – 28 с.

3. Михайлов Ю.С. Снижение влияния отказа двигателя на аэродинамические характеристики модели легкого транспортного самолета // Научный вестник МГТУ ГА. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 56–69.

4. Еременко В.В., Гарипов И.Р., Горюхин М.О. и др. Обоснование облика ультрамикрогазотурбинного двигателя в составе гибридной силовой установки // Вестник УГАТУ. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 16–28.

5. VoltAero HPU 210 Hybrid Power Unit Debuts at AirVenture [Электронный ресурс] // African Pilot Magazine. – 2025. – URL: https://africanpilot.africa/voltaeros-hpu-210-hybrid-power-unit/ (дата обращения: 13.04.2026).

6. Технологии есть – дело за малым: в МАИ обсудили экосистему гибридной авиации будущего [Электронный ресурс] // МАИ. – 2025. – URL: https://mai.ru/press/news/detail.php?ID=186602 (дата обращения: 13.04.2026).

© Макаров Н.С., 2026

УДК 621.313

П.К. МАРКЕЛОВ
*cnaperdodomarkelov@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

## АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ АТОМНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СЕРИИ АДМА НА ОБЪЕКТАХ РОСАТОМА

*Аннотация*. Авторами рассмотрены особенности асинхронных двигателей серии АДМА от АО «МЭЗ «Уралэлектро» и их преимущества.

*Ключевые слова*: преимущества конструкции, двигатель асинхронный, атомное исполнение, атомная электростанция.

В настоящее время в условиях действующей в стране программы импортозамещения обеспечение промышленности взрывозащищенным оборудованием отечественного производства является актуальной задачей [1]. Электродвигатели, кроме основного (вид «*d*»), по современным требованиям должны иметь дополнительно защиту вида «*e*», при которой в конструкции электродвигателей принимается ряд мер и конструктивных решений, существенно повышающих их надежность. По совокупным требованиям взрывозащит видов «*e*» и «*d*» в расчеты вводятся данные: по корпусным деталям (щиты, корпус), коробке выводов и присоединительным элементам, так как их удельный вес и затраты на их изготовление значительно отличаются от веса и затрат на аналогичные элементы электродвигателей общепромышленного применения (по данным производства на 27-30%). Наибольшее влияние на массогабаритные характеристики оказывает требование минимальной толщины корпуса и ряд других специфических требований, определяемых: конструкцией и пределом прочности материала; максимальным давлением взрыва испытательной смеси внутри электродвигателя; размерами взрывонепроницаемых соединений [2].

Исследование по данной теме было проведено под руководством специалистов АО «МЭЗ «Уралэлектро», которое занимается выпуском подобных электродвигателей с 1992 года [3]. Двигатели с этого завода используются как на всех объектах «Росатом», так и за границей: Бангладеш; Индия; Белоруссия; Египет.

Двигатели АДМА 63 – АДМА 180 трехфазные с короткозамкнутым ротором, предназначены для приводов агрегатов, машин и механизмов, расположенных в «чистых» помещениях и «грязных» боксах (вне герметичной зоны) атомных электростанций (АЭС). Также основные области применения – вентиляторы, насосы, приводы заглушек, транспортные системы, приводы перегрузочных машин реакторов, подъемное оборудование и т. д.

Двигатели серии АДМА полностью соответствует двигателям аналогичных серий по присоединительным размерам, и обладают рядом преимуществ:

– все алюминиевые детали имеют специальное покрытие (анодное оксидирование), которое позволяет увеличить работоспособность и безопасность электродвигателя во всех режимах работы АЭС (в том числе аварийных);

– улучшены энергетические показатели (КПД и cos φ) в среднем на 2–3%;

– улучшены вибро-шумовые характеристики в среднем на 5ДБ;

– имеют повышенную надежность (увеличенный срок службы (до 60 лет); вероятность безотказной работы за 2000 часов не менее 0,98; назначенный ресурс до капитального ремонта не менее 20000 часов). Таким образом, двигатели рекомендуются к применению в ответственных и сложных механизмах, для которых затруднен или невозможен ремонт, а также техническое обслуживание;

– способны работать с большими перепадами напряжения и частоты сети;

– повышенная стойкость к воздействию радиации (двигатели нормально работают и обеспечивают рабочие параметры при внешнем воздействии радиоактивного заражения);

– конструкция позволяет проводить дегазацию и дезактивацию принятыми штатными дезактивирующими растворами. Устойчивы к воздействию радиации до уровня 4-10-5 Гр/с и удельной активности 9,25÷1010 Бк/л;

– сохраняют работоспособность после аварийных режимов «Малой течи» и «Большой течи» с последующей дезактивацией. Двигатели могут работать в любых местах, где существует возможность радиоактивного заражения.

На рис. 1 изображена привязка мощности к установочным размерам. Проанализированы преимущества конструкций двигателей асинхронных атомного исполнения. В таблице 1 приведены характеристики двигателей серии АДМА.

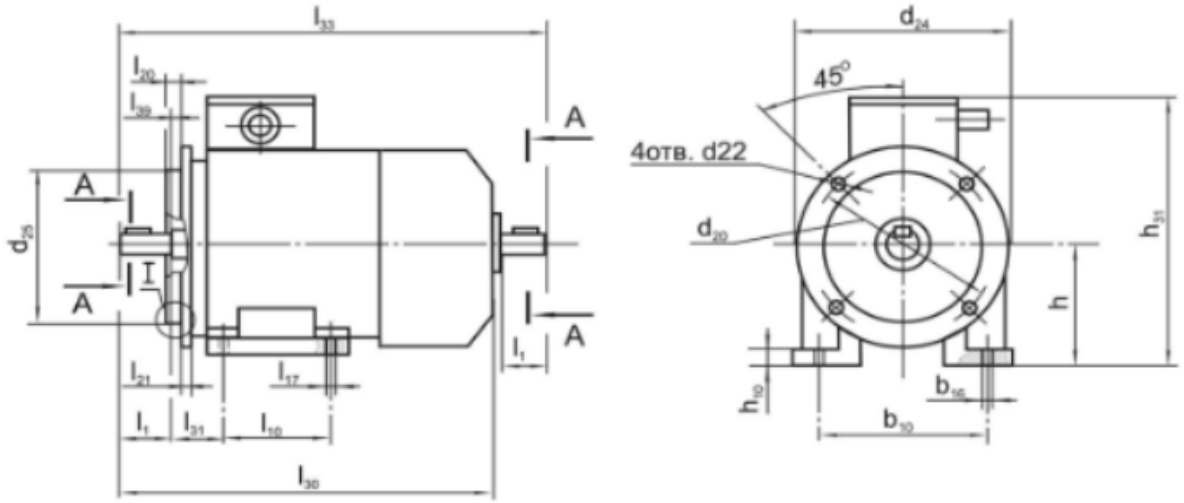



*Рис.1*. Привязка мощности двигателя к установочным размерам

Ставятся задачи оптимизации, при планируемом обновлении технологического оснащения производства и ведется поиск новых конструктивных решений. Совершенствуется модель параметрической оптимизации, на основе данных, характеризующих прототипы. При этом функциями цели на разных ступенях мощности принимаются один или несколько рабочих показателей электродвигателя, а в качестве параметров оптимизации, принимаются как внутренние параметры электродвигателя, так и внешние – характеристики управляющих воздействий и влияние агрегата, в который встраивается электродвигатель [1].

*Таблица 1*

Характеристики двигателей серии АДМА

| Типоразмер двигателя | Мощность, кВт | КПД, % | Коэффициент мощности | Скольжение, % | *М*пуск, *М*ном | *М*max, *М*ном | *М*min, *М*ном | *I*пуск, *I*ном |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| АДМА63А2 | 0,37 | 72,0 | 0,86 | 8,0 | 2,2 | 2,2 | 1,8 | 5,0 |
| АДМА63В2 | 0,55 | 75,0 | 0,85 | 8,0 | 2,2 | 2,2 | 1,8 | 5,0 |
| АДМА71А2 | 0,75 | 78,5 | 0,83 | 6,0 | 2,1 | 2,2 | 1,6 | 6,0 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| АДМА71В2 | 1,10 | 79,0 | 0,83 | 6,5 | 2,1 | 2,2 | 1,6 | 6,0 |
| АДМА80А2 | 1,50 | 82,5 | 0,85 | 5,0 | 3,0 | 3,4 | 1,8 | 7,0 |
| АДМА80В2 | 2,20 | 83,5 | 0,85 | 5,0 | 3,0 | 3,0 | 1,8 | 7,0 |
| АДМА90L2 | 3,00 | 82,0 | 0,85 | 5,0 | 2,3 | 2,6 | 1,8 | 7,0 |
| АДМА100S2 | 4,00 | 87,0 | 0,88 | 5,0 | 2,0 | 2,4 | 1,6 | 7,5 |
| АДМА100L2 | 5,50 | 88,0 | 0,88 | 5,0 | 2,1 | 2,2 | 1,6 | 7,5 |
| АДМА112М2 | 7,50 | 87,0 | 0,87 | 3,0 | 2,0 | 2,6 | 1,6 | 7,5 |
| АДМА132М2 | 11,0 | 88,0 | 0,86 | 3,0 | 1,6 | 2,2 | 1,2 | 7,5 |

**Библиографический список**

1. Афанасьев Ю. В., Пашали Д. Ю., Юшкова О. А. Средства конструкторской подготовки производства взрывозащищенных электродвигателей. Методики моделирования, расчета и испытания // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: The international scientific and practical conference materials. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: publishing complex USATU, 2020 – 546 pages.: pp. 271–275.

2. Исмагилов Ф. Р., Афанасьев Ю. В., Пашали Д. Ю. Взрывонепроницаемое уплотнение подшипникового узла электродвигателя (варианты) // Патент РФ № 2226241 опубл. 10.06.2003, БИ №16.

3. Каталог АО «МЭЗ «Уралэлектро». Асинхронный электродвигатели атомного исполнения серии АДМА для применения на объектах РОСАТОМА [Электронный ресурс] URL: https://uralelectro.ru/wp-content/uploads/Атомные-электродвигатели-серии-АДМА.pdf?ysclid=mo9p3kfly0650899869 (дата обращения 24.04.2026).

© Маркелов П.К., 2026

УДК 621.313.8

А.А. МИРГАЛИЕВ
*mirgaliev.ai@yandex.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Д.Р. ФАРРАХОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ МАШИНАМИ

*Аннотация.* В статье рассматриваются ключевые проблемы управления высокоскоростными электрическими машинами. Основное внимание уделено синхронным двигателям с постоянными магнитами (*PMSM*). Проанализированные такие методы, как: прямое управление моментов, многофазное векторное управление, стратегии ослабления поля, бездатчиковые управление. Сформулированы перспективные направления и нерешенные проблемы

*Ключевые слова*: Векторное управления, электропривод, высокоскоростная машина, система управления.

С развитием современной промышленности появилась потребность в электрических двигателях с высокой удельной мощностью на единицу массы, в частности, металлообрабатывающих шпинделях. Традиционные приводы для таких задач громоздки и неэффективны. В качестве двигателей высокоскоростных шпинделей сегодня преимущественно используются синхронные машины с постоянными магнитами (*Permanent magnet synchronous motor, PMSM),* обладающие лучшими массогабаритными показателями и энергоэффективностью на высоких скоростях по сравнению с другими видами.

Целью данной работы является обзор современных методов управления, выделение перспективных решений и слабо исследованных областей.

Одним из методов управления высокоскоростными машинами является прямое управлением моментом (*Direct Torque Control, DTC*). Как правило, этот метод реализуется через управление напряжением переменного тока, поскольку оно является гибким и простым в реализации. Однако из-за того, что реактивное сопротивление статора в высокоскоростных *PMSM* мало, просадок напряжения и искажений выходных токов ШИМ-инвертора (Широтно-импульсная модуляция) более серьезно, чем в обычных машинах, система управления (СУ) V/f обладает низкой стабильностью и плохими динамическими характеристиками. Метод DTC был успешно экспериментально проверен, однако были выявлены проблемы задержки датчиков тока, для компенсации которых использовался метод фазового опережения. Данный метод остается перспективным для высокоскоростных шпинделей благодаря высокой динамике и простоте реализации [1].

В качестве альтернативы DTC могут использоваться стратегии, основанные на векторном управление. Для работы на скоростях выше номинальной необходимо ослабление поля. Классические системы двухзонного регулирования не всегда отвечают жестким требованиям. В работе [2] исследуется трехзонное регулирование асинхронным двигателем. Результаты показали эффективность управления предложенным методом. Помимо моделирования в Matlab Simulink, был разработан экспериментальный стенд, подтверждающий данные исследования. На рисунке 1 представлена функциональна схема управления.

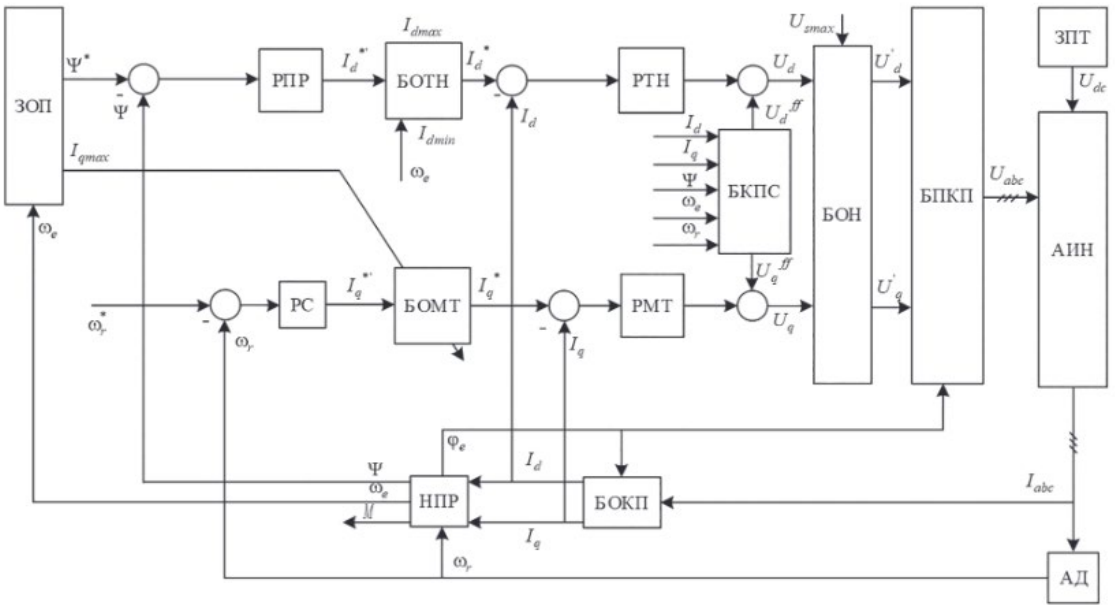



*Рис. 1.* Функциональная схема трехзонной СУ электроприводом высокоскоростного шпинделя

Выделяют метод многозонного управления и ослабления поля (Flux-Weakening Control). Данный метод позволяется работать с максимальным моментом в широком диапазоне скоростей. Экспериментальные и имитационные модели показывают превосходство данного метода над традиционной системой управления по переменному току с точки зрения снижения дисбаланса и гармонических составляющих тока [3, 4].

Для высокоскоростных машин не обязательно иметь датчик положения ротора, существует множество решений на основе бездатчикового управления. Выделяют два основных подхода: наблюдатели на скользящих режимах (Sliding mode observers, SMO) и адаптивная система с эталонной моделью (Model reference adaptive system, MRAS). Первые обладают высокой робастностью к возмущениям и не идеальностям инвертора. Вторые демонстрируют плавное поведение в установившихся режимах и лучший крутящий момент на низких скоростях, а также отличается более простой настройкой благодаря меньшему числу параметров [5, 6].

Также выявлены основные тенденции развития: это эволюция к бездатчиковому управлению и интеграция с другими стратегиями управления, такими как: SMC+MPC, SMC на основе искусственного интеллекта, нечеткой логики и алгоритмов оптимизации.

Существуют множество решений с управлением со скользящими режимами (Sliding mode control, SMC). Обзор таких решений приводится в работе [8]. Была проведена классификация этих методов, результаты которого показаны в таблице 1.

*Таблица 1*

Систематика стратегий управления скользящимими режимами (*SMC*) для регулирования скорости *PMSM*, охватывающая команды управления, конструкции поверхностей, законы достижения, наблюдателей, гибридные методы и структурные конфигурации

| Порядок | Дизайн поверхности | Законы достижения | Наблюдатели | Гибридные методы | Структура |
|---|---|---|---|---|---|
| *FOSMC* (*SMC* 1-го порядка) | Интегральная | Экспоненциальный | *ESO* (Расширенный наблюдатель состояния) | *SMC+PI* (*SMC* + ПИ-регулятор) | Одноконтурная |
| *SOSMC* (*SMC* 2-го порядка) | Терминальная | Адаптивный | *SMO* (Наблюдатель скользящего режима) | *SMC+PSO* (*SMC* + метод роя частиц) | Каскадная |
| *STSMC* (Твистинг *SMC*) | Не сингулярная | Конечно-временной | *FTDO* (Конечно-временной наблюдатель возмущений) | *FUZZY-SMC* (нечеткая логика *SMC*) | Бездатчиковая |
| *HOSMC* (*SMC* высшего порядка) | Дробного порядка | Дробного порядка | *ILC-DOB* (Наблюдатель возмущений с итеративным обучением) | *MPC+SMC* (Модель прогнозирующего управления + *SMC*) | Мульти-агентная |

Один их самых перспективных методов управления является прогнозирующее управление с моделью (Model predictive control, MPC). Этот метод отличается от других тем, что он реагирует не на случившуюся ошибка, на действует на опережение, предсказывая будущее. Главное преимущество MPC — способность изначально работать с физическими ограничениями. Такое управление позволяется повысить точность и устойчивость системы. Однако к главным недостаткам можно отнести вычислительную нагрузку и чувствительность к точности модели [9-12].

Таким образом, в этой работе проведен анализ основных методов управления. Наиболее подходящими методами управления являются DTC для сверхвысоких оборотов, а также FOC и SMC. MPC может использоваться с упрощенными системами или в комбинации с другими методами.

Были выявлены основные тенденции развития: эволюция к бездатчиковому управлению, интеграция с другими стратегиями управления, использование искусственного интеллекта, нечеткой логики и алгоритмов оптимизации. Параллельно развиваются такие методы как, безмодельное прогнозирующее управление (Model-free predictive control, MFPC) и

итеративное обучение (Iterative learning control, ILC), что позволяет избавиться от жесткой привязки к точности математической модели [13-15].

Были выявлены пробелы и нерешенные проблемы. Для многих продвинутых систем все еще остро стоит задача внедрения алгоритмов в стандартные промышленные контроллеры без потери качества управления [16]. Существует острый дефицит исследований с экспериментальной валидацией: многие сложные алгоритмы ограничиваются только симуляцией. Мало исследований для высокоскоростных машин с использованием самых современных методов, что открывает широкое поле для дальнейшей научной работы.

**Библиографический список**


1. Moniruzzaman M. et al. Implementation and Analysis of Direct Torque Control on High-Speed PMSMs: A Comparative Study of Commercial and Laboratory-Developed Motors //2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – IEEE, 2025. – С. 943-950.
2. Алексеев А. А., Красильникъянц Е. В., Тютиков В. В. Разработка и исследование трехзонной системы векторного управления высокоскоростным асинхронным шпинделем //Электричество. – 2023. – №. 8. – С. 46-53..
3. Hu Y. et al. Flux-weakening control of dual three-phase PMSM based on vector space decomposition control //IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Т. 36. – №. 7. – С. 8428-8438.
4. Borisavljevic A., Brands M., Lomonova E. Vector control of very-high-speed PM machines //2012 XXth International Conference on Electrical Machines. – IEEE, 2012. – С. 2462-2468.
5. De Simone D. et al. Experimental comparison of MRAS and Sliding Mode Observer for PMSM sensorless control //2025 IEEE 12th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED). – IEEE, 2025. – С. 1-7.
6. Nos O. V., Pudkova T. V., Kharitonov S. A. The sliding-mode observer for PMSM sensorless control with adaptive complex-coefficient filter and PLL //2023 XX technical scientific conference on aviation dedicated to the memory of NE Zhukovsky (TSCZh). – IEEE, 2023. – С. 44-49.
7. Petruio F. Model-based implementation and experimental evaluation of sensorless control algorithms for PMSM. – 2024.
8. Ajasa A., Aremu M. B., Nasir A. Sliding-Mode Control Strategies for PMSM speed control: A Comprehensive Review, Taxonomy and Research Gaps //arXiv preprint arXiv:2510.18420. – 2025.
9. Fuentes E., Silva C. A., Kennel R. M. MPC implementation of a quasi-time-optimal speed control for a PMSM drive, with inner modulated-FS-MPC torque control //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Т. 63. – №. 6. – С. 3897-3905.
10. Tang M., Zhuang S. On speed control of a permanent magnet synchronous motor with current predictive compensation //Energies. – 2018. – Т. 12. – №. 1. – С. 65.

11. Zhou W. et al. Sliding mode speed control for PMSM based on model predictive current //Electronics. – 2024. – Т. 13. – №. 13. – С. 2561.

12. Monadi M. et al. Speed control techniques for permanent magnet synchronous motors in electric vehicle applications toward sustainable energy mobility: A review //IEEE Access. – 2024. – Т. 12. – С. 119615-119632.

13. JiangWang S. et al. Data-Driven Control of PMSM via Neural Networks With Active Disturbance Learning //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2026.

14. Costin M., Bivol I. A New Paradigm in AC Drive Control: Data-Driven Control by Learning Through the High-Efficiency Data Set—Generalizations and Applications to a PMSM Drive Control System //Sensors. – 2024. – Т. 24. – №. 22. – С. 7313.

15. Liu J., Li H., Deng Y. Torque ripple minimization of PMSM based on robust ILC via adaptive sliding mode control //IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Т. 33. – №. 4. – С. 3655-3671.

16. Tian W. et al. Fast indirect model predictive control for variable speed drives //IEEE Transactions on Power Electronics. – 2023. – Т. 38. – №. 11. – С. 14475-14491.

© Миргалиев А.А., 2026

УДК 621.316.72

А.И. ВАСФИЕВ
*azamat.vasfiev.02@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Н.Л. БАБИКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗА ОБОРУДОВАНИЯ С АДАПТИВНОЙ УСТАВКОЙ ПО ТОКУ

*Аннотация*. В статье рассматривается эффективность функции автоматического ограничения перегруза оборудования с адаптивной уставкой по току. Проведено исследование влияния температуры окружающей среды на пропускную способность воздушной линии. Результаты анализа показали, что внедрение адаптивной системы позволяет повысить производительность системы в диапазоне до 10%.

*Ключевые слова*: автоматика ограничения перегруза оборудования, адаптивная уставка потоку, энергосистема, пропускная способность.

В современных энергосистемах отмечается устойчивый рост нагрузок в электрических сетях, что влечёт за собой повышение эксплуатационной

нагрузки на воздушные линии электропередачи (ВЛ), на некоторые из которых также накладываются транзитные перетоки мощности. В экстремальных режимах перераспределение перетоков мощности может привести к превышению допустимых уровней загрузки и последующей перегрузке отдельных электросетевых элементов.

Традиционная автоматика ограничения перегрузки ВЛ имеет два набора уставок по току, рассчитанных для зимних и летних температур. Подобная методика имеет существенный недостаток: чаще всего реальная температура проводов оказывается меньше расчетной, которая обычно определяется исходя из самых неблагоприятных условий эксплуатации линии в жаркое время суток и года, без учета ветра и так далее. Поэтому действие автоматики по данному принципу может приводить к неоправданному ограничению электроснабжения потребителей еще до достижения условий для ограничения по пропускной способности ВЛ.

В регионах, где наблюдаются существенные колебания температуры, применяется величина допустимой токовой нагрузки(ДТП), периодически корректируемая по внешним условиям (на основании прогноза температуры воздуха). Например, если сезонная токовая нагрузка для летнего периода рассчитана для +35℃, то в случае наличия прогноза, в соответствии с которым в течение следующих 24 часов температура воздуха не превысит +25℃, токовая нагрузка может быть увеличена на 10 %. Недостатком этого метода является то, что при таких расчётах учитывается только температура воздуха, а воздействие ветра и солнечной радиации не учитывается.

Рассмотрим, как меняются значения допустимой длительной (ДДТН) и аварийно допустимой (АДТН) токовой нагрузки в зависимости от суточных колебаний температуры. В качестве примера возьмём типичный температурный график для ВЛ 110 кВ. Расчёты взяты из [1] и приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

Зависимость $I_{ддтн}$ и $I_{адтн}$ от температуры наружного воздуха

| $T$, ℃ | -15 и ниже | -10 | -5 | 0 | +5 | +10 | +15 | +20 | +25 | +30 | +35 | +40 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{ддтн}$, А | 973 | 944 | 916 | 888 | 852 | 816 | 788 | 745 | 710 | 667 | 624 | 581 |
| $I_{адтн}$, А | 1048 | 1013 | 977 | 940 | 902 | 863 | 823 | 781 | 737 | 691 | 643 | 595 |

Изменение пропускной способности ВЛ в течение суток рис.1:

0–6 часов (ночь, температура опускается до +15°С, охлаждение):

Значения ДДТН и АДТН достигают максимальных показателей — 788 А и 823 А соответственно. Это указывает на оптимальное время для повышенной загрузки линии.

6–15 часов (утро и день, рост температуры до 30 °С):

ДДТН: плавно снижается с максимума до минимума с 788А до 710А.

АДТН: снижается сильнее с 823А до 737А.

15 час (Критический момент температура максимальна 30 °С);

ДДТН и АДТН минимальны 667А и 691А — высокий риск перегрузки, требуется жёсткий контроль.

15–24 часа (вечер и ночь, падение температуры):

ДДТН и АДТН постепенно увеличивается.

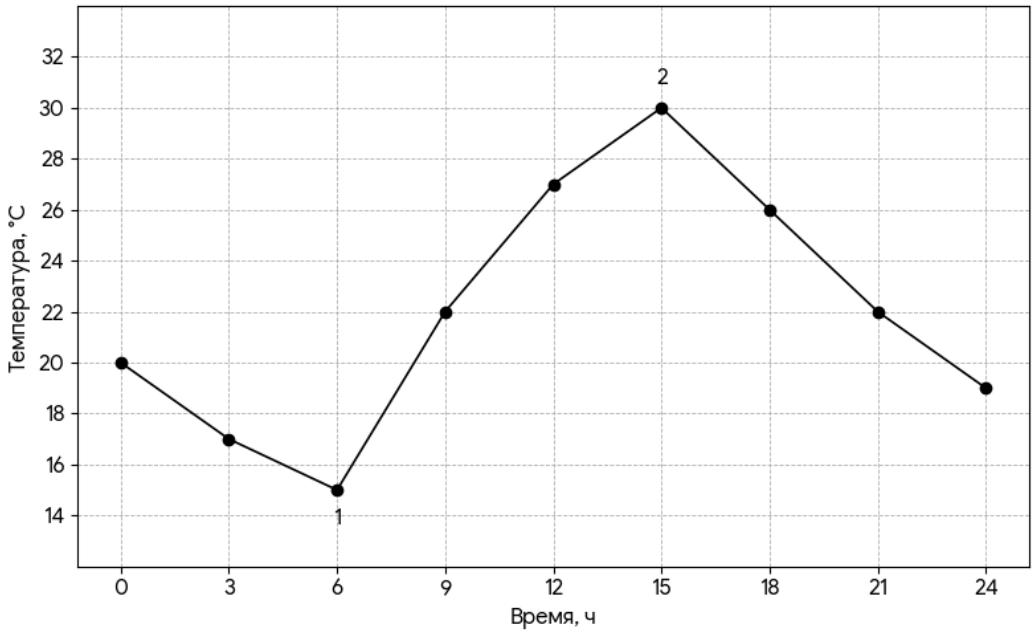



*Рис. 1.* Суточный ход температуры воздуха в июле.
1 – ночной минимум температуры; 2 – дневной максимум температуры.

Суточный ход температуры вызывает циклическое изменение ДДТН и АДТН с амплитудой 100–130 А, что приводит неоотпуску электроэнергии и, как следствие, снижению экономической эффективности функционирования электростанции примерно на 10%.

Устройство АОПО ВЛ с контролем температуры воздуха, в отличие от классического АОПО, позволяет более полно использовать пропускную способность линии за счёт применения температурно-токовых таблиц, рассчитанных для диапазона температур наружного воздуха от –50°С до +50°С (как правило, с шагом 5°С), либо за счёт построенной по этим данным кусочно-линейной функции допустимого тока от температуры воздуха[2].

Датчики, измеряющие температуру воздуха и установленные на территории подстанции (ПС), передают данные в систему АОПО. Это позволяет:

–Оперативно корректировать допустимую нагрузку на ВЛ;

–Использовать пропускную способность линии на предельном, но безопасном уровне в любых температурных условиях;

–Минимизировать износ оборудования за счёт предотвращения перегрузок.

Вывод

Исследование эффективности функции автоматического ограничения перегруза оборудования с адаптивной уставкой по току показало, что её внедрение обеспечивает повышение пропускной способности энергосистемы до 10%. Данный результат подтверждает техническую и экономическую целесообразность использования адаптивной системы для повышения эффективности работы энергетического оборудования при сохранении необходимого уровня защиты от перегрузок.

## Библиографический список


1. Беляевский Р.В., Утюж Т.И. Расчет параметров функционирования автоматики ограничения перегрузки оборудования при выдаче мощности электростанций в ремонтных режимах электрическойсети // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 5 (181). С. 3-13. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-3-13, EDN: VRDDXX.
2. Назаров И.А., Киреев С.М., Мерзляков А.С. и др. Адаптивная автоматика ограничения перегрузок воздушных линий // Электропередача и распределение энергии. 2022. № 2 (71). С. 40–48. УДК 621-311.1:621.3.05.
3. СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. – 2013.
4. СТО 56947007-29.060.20.170-2014. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. – 2014.
5. РД 34.20.547. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи. – 1987.
6. Разумов Р. В., Петров А. А., Трифонов Д. В., Иванов А. В., Басаркин В. А. Особенности применения автоматики ограничения перегруза оборудования с адаптивной токовой уставкой. Примеры реализации проекта АОПО на Заинской ГРЭС и ПС Тамань // Релейная защита и автоматизация. — 2016. — № 3 (24). — С. 58–64.


© Васфиев А.И., 2026

УДК 621.3

А.А. НИКОЛАЕВА
*nik.arina06@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Н.Л. БАБИКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ОСНОВЫ NANOCAD В УЧЕБНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

*Аннотация*. В статье рассматриваются функциональные возможности системы автоматизированного проектирования NanoCAD для освоения студентами, обучающимися по направлению электроэнергетика и электротехника. Представлена актуальность приобретения компетенций по созданию пользовательских блоков, построению электрических схем, формированию спецификаций и созданию планов расположения оборудования.

*Ключевые слова:* NanoCAD; САПР; автоматизация проектирования.

Традиционно подготовка специалистов-электроэнергетиков включала освоение навыков ручного черчения и работы в универсальных графических редакторах, не адаптированных под создание электрических схем и планов расположения оборудования. Для выпускников это приводило к высоким временным затратам, ошибкам при оформлении документации и сложностям с внесением изменений в готовый проект.

С развитием информационных технологий в образовательный процесс активно внедряются системы автоматизированного проектирования (САПР). Одной из таких систем является NanoCAD – отечественная платформа, доступная для использования в вузах и обладающая функционалом, сопоставимым с зарубежными аналогами [1, 2].

Как отмечается в работе [5], подготовка востребованных инженерных кадров невозможна без тесного взаимодействия университета с производственными предприятиями. Одним из инструментов, позволяющих приблизить учебный процесс к реальным отраслевым задачам, является освоение современных САПР, в частности NanoCAD.

В работе будут рассмотрены функциональные возможности NanoCAD, которые являются актуальными при подготовке специалистов в области электроэнергетики для формирования профессиональных навыков выполнения проектных работ. Для студентов первых курсов большое значение имеет конструкторская подготовка. Успешное выполнение проектов в будущем невозможно без освоения базовых возможностей работы в программных продуктах.

Далее рассмотрены ключевые возможности базовой NanoCAD, позволяющей освоить основы работы для дальнейшего развития навыков выполнения проектных работ [1].

1. Создание пользовательских блоков.

Одной из полезных функций NanoCAD является создание пользовательских блоков. Любой нарисованный объект или группу объектов можно объединить в единый элемент и использовать многократно (рисунок 1).

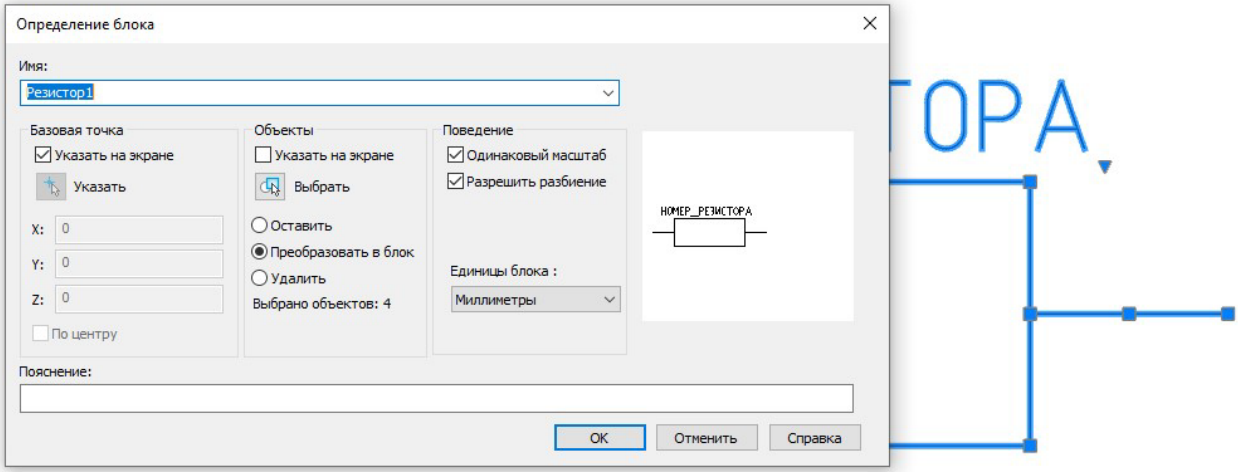



*Рис. 1*. Создание пользовательского блока

Для создания блока необходимо выделить нужные объекты, нажать правой кнопкой мыши и выбрать «Создать блок» или воспользоваться соответствующей кнопкой на вкладке «Вставка». После этого задаётся имя блока и точка вставки. Готовый блок сохраняется в текущем чертеже и может быть вставлен в любое место.

Возможность создания готовых блоков упрощает процесс проектирования: студент может один раз начертить условное обозначение трансформатора, выключателя или реле, сохранить его как блок и затем использовать многократно. Это сокращает время выполнения однотипных операций и позволяет сосредоточиться на выполнении задания, а не на рисовании одних и тех же элементов.

2. Построение электрических принципиальных схем.

На базе созданных или стандартных графических примитивов в NanoCAD можно строить электрические принципиальные схемы (рисунок 2). Программа предоставляет все необходимые инструменты для работы с линиями, окружностями, текстом и другими объектами.

Функционал программы позволяет быстро выполнять схемные решения, экспериментировать с составом оборудования и наглядно видеть результат. При необходимости изменения схемы не требуется перечерчивать весь лист заново – достаточно отредактировать отдельные элементы.

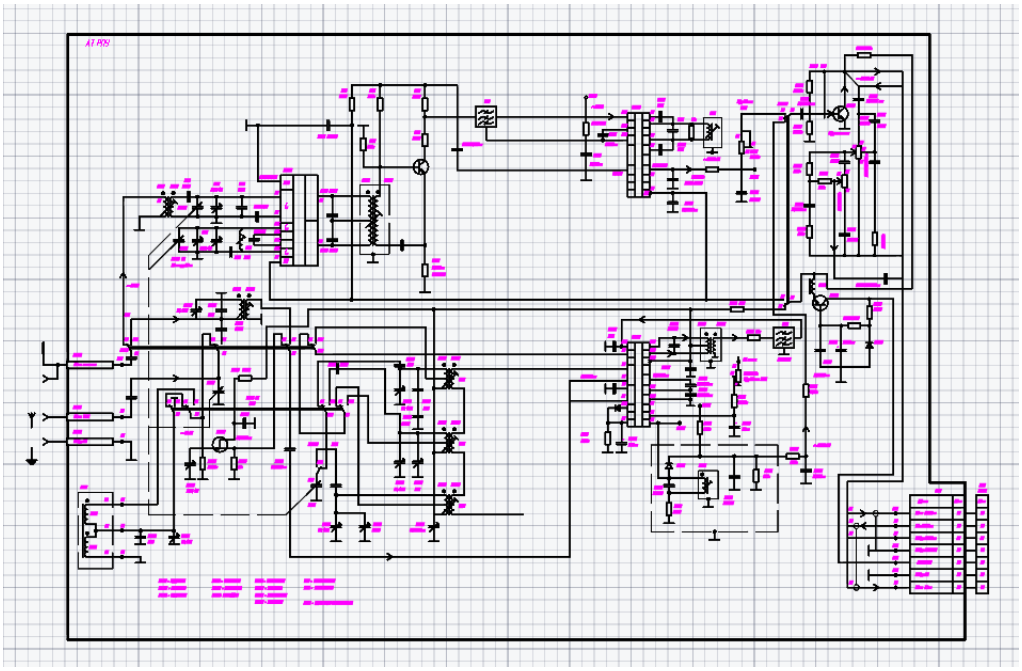


*Рис. 2*. Пример выполнения принципиальной электрической схемы

3. Создание спецификаций в виде таблиц.

После разработки схемы необходимо составить перечень использованных элементов – спецификацию. В NanoCAD для этого предусмотрен инструмент создания таблиц. Таблица может быть размещена на любом месте чертежа, в неё удобно вносить наименования элементов, их количество и примечания. Размер и формат таблицы настраиваются пользователем. Этот инструмент заменяет ручное вычерчивание рамок и строк, что ускоряет оформление документации и делает её более аккуратной.

4. Создание планов расположения оборудования.

Помимо принципиальных схем, в деятельности электроэнергетика востребованы планы расположения оборудования – чертежи зданий или цехов с указанием мест установки щитов, прокладки кабельных трасс, размещения розеток и светильников. NanoCAD позволяет выполнять такие чертежи в единой среде.

В учебных задачах это даёт возможность моделировать реальные проектные ситуации: студент учится учитывать планировку помещения, соблюдать нормируемые расстояния между оборудованием, оформлять чертёж в соответствии с требованиями [4].

5. Экспорт документации в PDF.

Важным этапом любой проектной работы является оформление текстовой документации для передачи на проверку или в производство. NanoCAD поддерживает экспорт не только графической, но и текстовой документации в удобные форматы, что позволяет студентам представлять результаты своей работы в удобном для просмотра виде.

Имеющиеся возможности позволят студентам получить базовые навыки работы в среде САПР. Освоив создание блоков, построение схем и оформление

таблиц, обучающийся будет готов к переходу на более функциональные продукты линейки NanoCAD. Интерфейс всех продуктов экосистемы универсален, поэтому при переходе на другие конфигурации (nanoCAD Pro, nanoCAD Standart Mech) не возникнет особых сложностей. Это позволяет легко адаптироваться к требуемым техническим заданиям заказчиков и выполнению специализированных задач – от проектирования электросетей до отрисовки узлов и схем.

В работе рассмотрены основные функциональные возможности NanoCAD, применимые в учебном процессе при подготовке специалистов в области электроэнергетики. К их числу относятся:

- создание пользовательских блоков для многократного использования;
- построение электрических схем с помощью базовых графических примитивов;
- оформление спецификаций через инструмент «Таблица»;
- разработка планов расположения оборудования;
- экспорт готовой документации в формат PDF.

Освоение базового функционала NanoCAD создаёт основу для перехода к специализированным решениям, таким как NanoCAD BIM Электро, NanoCAD СПДС и другим продуктам. Эти платформы включают готовые библиотеки стандартных изделий, автоматическую нумерацию проводов, формирование однолинейных схем и другие инструменты, востребованные в профессиональном проектировании. Таким образом, навыки, приобретённые при работе с базовой версией, станут основой для дальнейшего изучения BIM-технологий и продуктов линейки NanoCAD.

## Библиографический список

1. NanoCAD. Официальный сайт. Режим доступа: https://www.nanocad.ru/ (дата обращения: 30.04.2026)

2. Документация по NanoCAD. Режим доступа: https://www.nanocad.ru/products/nanocad/ (дата обращения: 30.04.2026)

3. Романычева Э.Т., Сидоров А.К. Разработка конструкторской документации в САПР: учебное пособие. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 248 с.

4. ГОСТ 2.702-2011. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения электрических схем.

5. Бабикова, Н. Л. Взаимодействие образовательной организации и производственных предприятий как основа подготовки инженерных кадров для электроэнергетики / Н. Л. Бабикова, А. Р. Валеев, Д. Ю. Пашали // Инженерное образование: содержание, технологии и оценка качества: Материалы международной научно-практической конференции, Казань, 29–30 мая 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 319-323. – EDN GMOOVB.

© Николаева А.А., 2026

УДК 621.313

А.О. НИКОНОВ
*nikonov200521@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Т.Р. ТЕРЕГУЛОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОННЫХ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО ИСПОЛНЕНИЯ Ex ep

*Аннотация*. Рассматриваются вопросы выбора главного электродвигателя для насосных агрегатов, эксплуатирующихся во взрывоопасных средах на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах. Проведен технико-экономический анализ асинхронных и синхронных взрывозащищенных электродвигателей, обоснованы преимущества синхронной машины в части энергоэффективности, коэффициента мощности и стабильности работы.

*Ключевые слова*: синхронный электродвигатель, взрывозащита Ex ep, магистральный насос, перекачка нефти, энергоэффективность, асинхронный двигатель, магистральный нефтепровод, магистральный нефтепродуктопровод.

Магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы являются ключевым элементом транспортной инфраструктуры топливно-энергетического комплекса России, обеспечивая бесперебойную транспортировку нефти на дальние расстояния. Эффективность работы данных систем напрямую зависит от надежности и экономичности основного технологического оборудования — насосных агрегатов нефтеперекачивающих станций (НПС). Условия эксплуатации электродвигателей на НПС характеризуются непрерывным циклом работы, требующим от оборудования высокой наработки на отказ. Кроме того, НПС относятся к объектам с взрывоопасными зонами (возможные утечки нефти и паров углеводородов) как внутри помещений, так и снаружи, что предъявляет жесткие требования к исполнению высоковольтных двигателей.

Традиционно применяемые асинхронные двигатели не в полной мере отвечают возросшим требованиям к коэффициенту полезного действия (КПД) и коэффициенту мощности (cosφ). Низкий cosφ асинхронных машин приводит к дополнительным потерям в питающих сетях, требует установки массивных устройств компенсации реактивной мощности и увеличивает нагрузку на трансформаторы. Это обусловливает необходимость поиска более совершенных технических решений, одним из которых, является применение синхронных взрывозащищенных двигателей.

В современных экономических условиях приоритетной задачей является снижения эксплуатационных затрат, значительную долю которых составляют потери электроэнергии в процессе перекачки. В связи с этим актуален выбор типа главного электродвигателя, способного обеспечить высокие показатели энергоэффективности без ущерба для взрывобезопасности и надежности.

Для объективной оценки рассмотрены два варианта электродвигателя для насосного агрегата мощностью $P_{ном} = 6300 кВт$ – типичной для магистральных насосов. Сравнение проведено по серийным взрывозащищённым двигателям, соответствующим требованиям для взрывоопасных зон. Асинхронные двигатели аналогичной мощности имеют номинальный КПД на уровне 96,0–96,5% и коэффициент мощности cosφ = 0,85–0,87. Синхронные машины демонстрируют более высокий КПД (на 1–1,5 %), достигающий 97,5%, что обусловлено, в частности, большей величиной воздушного зазора, снижающей добавочные потери в стали и в клетке ротора.

Количественную оценку снижения потерь можно выполнить по формуле: $\Delta P = P_{ном} \cdot (\frac{1}{\eta_a} - \frac{1}{\eta_c})$, где $P_{ном} = 6300 кВт$, $\eta_a$ и $\eta_c$ – КПД асинхронного и синхронного двигателей соответственно. Принимая $\eta_a = 0{,}965$ и $\eta_c = 0{,}975$, получаем: $\Delta P = 6300 \cdot (\frac{1}{0{,}965} - \frac{1}{0{,}975}) \approx 67{,}4 кВт$. Таким образом, снижение потерь составляет примерно 67,4 кВт.

Важнейшее преимущество синхронного двигателя – возможность регулирования коэффициента мощности за счёт изменения тока возбуждения. В отличие от асинхронного, работающего с отстающим cosφ (0,85–0,87), синхронная машина может быть настроена на cosφ = 1,0 (режим нормального возбуждения), при котором она потребляет из сети только активную мощность, разгружая питающую сеть и уменьшая суммарные потери. При перевозбуждении синхронный двигатель работает с опережающим cosφ (например, 0,9) и генерирует реактивную мощность в сеть, выполняя функцию синхронного компенсатора. Это позволяет локально компенсировать реактивную нагрузку асинхронных вспомогательных механизмов НПС (насосы охлаждения, вентиляторы и т.д.), снижая или полностью исключая необходимость в установке статических конденсаторных батарей. Кроме того, система автоматического регулирования возбуждения обеспечивает форсировку – при глубоких провалах напряжения ток возбуждения увеличивается, что способствует более быстрому восстановлению напряжения на шинах станции и повышению предела динамической устойчивости, предотвращая выпадение двигателя из синхронизма. Также следует отметить, что максимальный электромагнитный момент синхронного двигателя зависит от напряжения линейно, тогда как у асинхронного он падает пропорционально квадрату напряжения, что делает синхронный двигатель менее чувствительным к кратковременным провалам напряжения – это критично для насосных агрегатов с жёсткой механической характеристикой.

Наряду с отмеченными достоинствами, синхронный двигатель обладает недостатками, связанными с его конструкцией. В рассматриваемом исполнении с прямым пуском от сети на роторе присутствует пусковая короткозамкнутая обмотка. Прямой пуск вызывает значительные броски пускового тока, превышающие номинальный ток в 5–8 раз, что может приводить к падению напряжения в питающей сети и создавать помехи для работы другого оборудования. Пусковая обмотка рассчитана на кратковременный режим, и при нескольких пусках подряд либо при затянувшемся асинхронном режиме возможен её перегрев. Несмотря на указанные ограничения, для насосных агрегатов большой мощности, работающих в длительном установившемся режиме, преимущества синхронного электродвигателя – высокий КПД, возможность работы с перевозбуждением и стабилизация напряжения – обеспечивают снижение эксплуатационных расходов. Годовая экономия электроэнергии при работе насосного агрегата Т = 8000 ч/год определяется как: $W_{эк} = \Delta P \cdot T = 67{,}4 \cdot 8000 = 539200 кВт \cdot ч / год$. Принимая диапазон тарифов на электроэнергию для промышленных потребителей от 4,0 до 7,0 руб./кВт·ч (по данным ФАС России и региональных энергосбытовых компаний за 2025 год), годовая денежная экономия составит от нижней границы в 2156800 руб./год до верхней границы в 3774400 руб./год. Дополнительные капитальные затраты на синхронный двигатель по сравнению с асинхронным аналогом могут быть выше ориентировочно на 30–50%. При таком удорожании годовая экономия электроэнергии позволяет компенсировать разницу в цене в период от 2 до 5 лет, что подтверждает экономическую целесообразность применения синхронных двигателей (при учёте только одной экономии электроэнергии, без учёта повышения надёжности в аварийных ситуациях, генерации реактивной мощности и др.).

Обеспечение взрывозащищенности синхронных двигателей для НПС достигается комплексом конструктивных мер. В качестве технического решения предлагается комбинированная взрывозащита видов «е» и «р», соответствующая требованиям ГОСТ Р МЭК 60079-7-2012 (вид «е» – повышенная защита от возможного превышения допустимой температуры) и ГОСТ Р МЭК 60079-2-2011 (вид «р» – продувка оболочки под избыточным давлением). Взрывозащита вида «е» реализуется за счёт усиленной изоляции с применением термореактивных материалов (эпоксидных, полиэфирных), исключающих появление электрических дуг и искр в нормальном режиме работы; герметизации обмоток – пазы статора заливаются компаундом, что предотвращает проникновение паров углеводородов внутрь изоляции и исключает возможность частичных разрядов; системы контроля температуры – встроенные термодатчики отключают двигатель при превышении допустимой температуры, исключая перегрев как потенциальный источник воспламенения; а также специальной конструкции клеммной коробки – отдельного взрывозащищенного исполнения, исключающего искрение в месте подключения кабелей. Дополнительно применяется взрывозащита вида «р»: внутрь герметичного корпуса двигателя под избыточным давлением подается

чистый воздух от внешней системы продувки, давление внутри корпуса постоянно поддерживается выше атмосферного. Это гарантирует, что взрывоопасная смесь паров и газов не может проникнуть внутрь оболочки, где возможно искрение или образование электрической дуги (особенно в роторной цепи, на контактных кольцах). Система автоматически отключает двигатель от всех источников электроэнергии при снижении избыточного давления воздуха ниже установленного предела, а перед пуском выполняется обязательная продувка с выдержкой времени для вытеснения возможной взрывоопасной среды. Сочетание обоих принципов – повышенной надежности («е») и продувки под избыточным давлением («р») – обеспечивает требуемый уровень взрывозащиты для эксплуатации во взрывоопасных зонах.

Анализ проектов технического переоснащения нефтепроводной системы России подтверждает тенденцию перехода на синхронные электродвигатели магистральных насосов. В настоящее время такие двигатели с комбинированной взрывозащитой Ex ep эксплуатируются на ряде объектов ПАО «Транснефть», включая: НПС «Абатская» (АО «Транснефть – Западная Сибирь»), НПС «Каштан» (Красноярский край), ЛПДС «Западный Сургут», Анжеро-Судженскую и Рыбинскую ЛПДС, а также ЛПДС Чепурского ПАО «Транснефть».

Результаты анализа свидетельствуют о целесообразности замены асинхронных электродвигателей на синхронные с комбинированной взрывозащитой Ex ep при реконструкции НПС и использования синхронных двигателей в проектах нового строительства. При этом достигается значительная экономия электроэнергии, повышается надёжность и снижается зависимость от внешних устройств компенсации реактивной мощности.

**Библиографический список**

1. ГОСТ 30852.0-2002 (МЭК 60079-0:1998). Электрооборудование взрывозащищенное. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2002.

2. ГОСТ Р МЭК 60079-7-2012. Взрывоопасные среды. Часть 7. Оборудование с видом взрывозащиты «повышенная безопасность е». – М.: Стандартинформ, 2014.

3. ГОСТ Р МЭК 60079-2-2011. Взрывоопасные среды. Часть 2. Оборудование с видом взрывозащиты «заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением р». – М.: Стандартинформ, 2013.

4. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для электротехнических специальностей вузов. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1978. – 832 с.

5. Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 440 с.: ил.

© Никонов А.О., 2026

УДК 621.313.13

А.Ф. НУРГАЛИЕВ
*algiz.nurgaliev@mail.ru*
Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент. Т.Р. ТЕРЕГУЛОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ДВИГАТЕЛЬ СИНХРОННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ ДЛЯ ИНВАЛИДНОЙ КОЛЯСКИ

*Аннотация*. В данной статье рассматривается возможность использования синхронного реактивного двигателя в качестве безредукторного тихоходного малоинерционного привода для инвалидной коляски. Произведен расчет электромагнитного момента для данного двигателя с катящимся ротором, необходимый для данной системы.

*Ключевые слова*: Двигатель синхронный реактивный, двигатель с катящимся ротором (ДКР), инвалидная коляска, безредукторный привод, тихоходный двигатель, электромагнитный момент, силы одностороннего магнитного притяжения (СОМП), униполярное подмагничивание.

Актуальность темы обусловлена тем, что использование в системах, где наиболее важными параметрами являются хорошие энергетические показатели и маленькие скорости вращения, наиболее целесообразно применять тихоходные малоинерционные двигатели с катящимся ротором в отличие от быстроходных двигателей с редуктором с большим количеством передаточных звеньев. Для двигателей с катящимся ротором для уменьшения скорости в системах не требуется наличие редуктора. К тому же отсутствие редуктора в данном двигателе повышает его надежность, уменьшает его массогабаритные характеристики.

ДКР относятся к синхронным реактивным двигателям, основным отличием которых является отсутствие обмотки на роторе. Это тихоходные электродвигатели с высоким вращающим моментом и низкой частотой вращения вала. Другой принципиальной особенностью ДКР, отличающей их от других машин, является эксцентричное расположение ротора в расточке статора. Вращающий момент здесь создается за счет сил одностороннего магнитного притяжения (СОМП).

Основным достоинством данного двигателя, конечно же является его использование в безредукторном электроприводе. Скорость выходного вала может достигать от 2 до 200 об/мин. Безредукторный электропривод с двигателем с катящимся ротором будет иметь хорошие динамические показатели из-за того, что приведенный момент инерции ротора мал.

Время разгона ДКР составляет 0,01 сек. Реверс двигателя происходит переключением следования фаз за время примерно равным 0,015 – 0,025 сек.

Применение двигателя с катящимся ротором в качестве приводного двигателя в системах автоматизированного электропривода является рациональным, так как при отключении от питания по переменному току он развивает значительный тормозной момент, который будет превышать номинальный электромагнитный момент. И в этом случае в использовании тормозных муфт и самотормозящихся кинематических звеньев нет никакой необходимости.

Также двигатель с катящимся ротором имеет достаточно высокие энергетические показатели. Относительно высокие значения коэффициента мощности, большие значения к. п. д., примерно равные значениям к. п. д. обычных исполнительных двигателей такой же мощности. Наряду с хорошими энергетическими показателями ДКР имеет кратность пускового тока порядка 2 – 3.

**Ротор двигателя** совершает сложное движение: ось его синхронно вращается с полем по окружности диаметром 2e, а сам ротор поворачивается медленно вокруг этой оси. Для передачи момента, соответствующего медленному вращению ротора вокруг своей оси, можно использовать различные кинематические передачи, звенья и муфты.

Эксцентрическое вращение ротора ДКР обусловливает появление центробежной силы и нежелательных вибраций системы. Уменьшение вибраций возможно различными конструктивными способами, например, с помощью: 1) эластичной подвески статора; 2) балансирующего противовеса; 3) расположения сбалансированного ротора двигателя на коленчатом валу; 4) динамического балансира. Как известно, вибрации в динамической системе будут отсутствовать, если приведенный центр массы подвижных элементов не изменяет своего пространственного положения.

В данной работе выбрана конструкция сбалансированного ротора на коленчатом валу.

На рис. 1 приведен ротор в сборе для двигателя синхронного реактивного с катящимся ротором для инвалидной коляски.

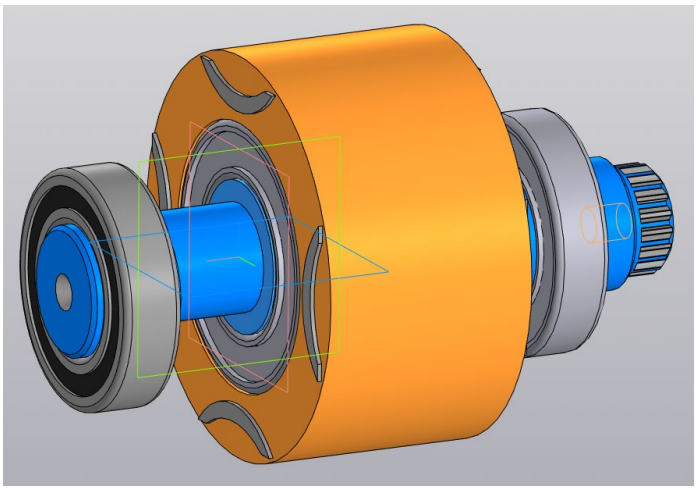


*Рис. 1.* Ротор в сборе двигателя синхронного реактивного с катящимся ротором

**Расчет необходимого момента, который должен развивать двигатель**

Для расчета были приняты стандартные значения для инвалидной коляски (таблица 1).

*Таблица 1*

Расчетные данные

| | |
|---|---|
| Общий вес (*G*), кг | 200 |
| Крутой уклон (α) | 10 % (что соответствует углу ~ 5,7°) |
| Диаметр колеса (*D*), м | 0,3 |
| Коэффициент сопротивления качению (*f*) для асфальта, % | 1 |

1.1.1 Расчет силы тяги:

$$F_{\text{тяги}} = F_{\text{уклона}} + F_{\text{качения}}.$$

Сила для преодоления уклона:

$$F_{\text{уклона}} = G \cdot \sin\alpha,$$

$$F_{\text{уклона}} = 2000 \cdot \sin(5{,}7°) = 200 \text{ Н}.$$

Сила для преодоления трения качения:

$$F_{\text{качения}} = G \cdot f,$$

$$F_{\text{качения}} = 2000 \cdot 0{,}01 = 20 \text{ Н}.$$

Следовательно, сила тяги

$$F_{\text{тяги}} = 200 + 20 = 220\ H.$$

1.1.2 Требуемый крутящий момент на одном колесе:

$$M = F_{\text{тяги}} \cdot R,$$

$$M = 220 \cdot 0{,}15 = 33 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

1.2 Расчет электромагнитного момента

В отличие от основного расчетного уравнения классического типа в расчетное уравнение ЭМКР должны входить параметры, связанные с величиной эксцентриситета.

1.2.1 Электромагнитный момент магнитного поля до редукции [1, формула 3-56, с. 104]:

$$\text{М}_{\text{эм.}} = \frac{\pi}{2 \times \sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot D_1^3 \cdot k_{\text{об1}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot \sin(\beta),$$

$$M_{\text{эм.}} = \frac{\pi}{2\times\sqrt{2}} \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1^3 \cdot 0{,}96 \cdot 20626{,}5 \cdot 0{,}36 \cdot 0{,}7 = 2{,}7 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\beta$ – угол, определяющий фазу волны линейной нагрузки.

1.2.2 Момент на колесе при редукции синхронной скорости:

$$\text{М}_2 = M_{\text{эм.}} \cdot k_{\text{ред.}} \cdot \eta_{\text{пер.}},$$

где $k_{\text{ред.}}$ и $\eta_{\text{пер.}}$ – редукция синхронной скорости и К.П.Д. передачи;

$$\text{М}_2 = 2{,}7 \cdot 14 \cdot 0{,}9 = 34 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полученное значение электромагнитного момента удовлетворяет нашим требованиям.

1.2.3 Электромагнитная мощность [1, формула 3-57, с. 104]

$$P_э = \lambda \cdot D_1^3 \cdot n_2 \cdot k_{ред.} \cdot \sigma_1,$$

где $n_2$ – скорость вала ЭМКР,

$\sigma_1 = 11{,}6 \cdot 10^{-2} \cdot k_{об1} \cdot A \cdot B_\delta \cdot \sin(\beta)$ – коэффициент использования ЭМКР;

$P_э = 0{,}5 \cdot 0{,}1^3 \cdot 150 \cdot 14 \cdot 11{,}6 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}96 \cdot 20626{,}5 \cdot 0{,}36 \cdot 0{,}7 = 607{,}8$ Вт.

Полученное значение электромагнитного момента удовлетворяет нашим требованиям.

Проведенное исследование и расчеты двигателя синхронного реактивного с катящимся ротором, показывают, что данный двигатель обладает характеристиками, которые подходят для использования в качестве привода для инвалидной коляски. ДКР имеют значительное количество достоинств, что позволяют данному двигателю конкурировать с классическими системами, такие как быстроходные двигатели с редуктором (рисунок 2).

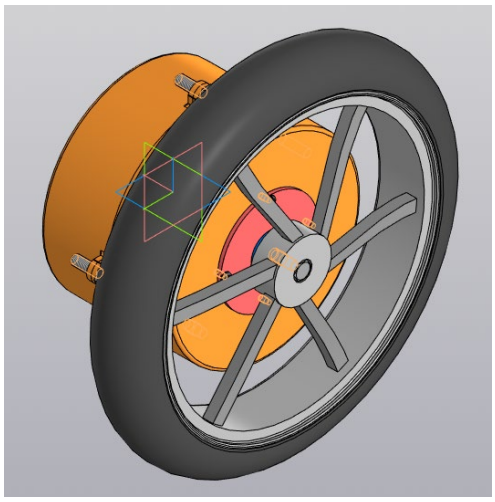


*Рис. 2.* Двигатель синхронный реактивный с катящимся ротором с колесом для инвалидной коляски

К сожалению, данные двигатели с катящимся ротором в наше время не обрели значительного промышленного использования в России, в частности, отсутствием разработанной теории и методов проектирования.

Применяемые сегодня материалы (электротехнические стали, постоянные магниты) имеют лучшие характеристики, чем материалы 20 века, что позволяет вновь взяться за усовершенствование существующих конструкций ДКР.

**Библиографический список**

1. Бертинов А.И. Электрические машины с катящимся ротором / Бертинов А.И., Варлей В.В. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.

2. https://studfile.net/preview/9439677/page:18/.

© Нургалиев А.Ф., 2026

УДК 62-83

НЗУПЕТ ЧАВУА АНТУАН РОСТАНТ
*antuantchavua@yandex.ru*
Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Н.Л. БАБИКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

*Аннотация*. В статье рассматривается актуальность перехода транспортных средств с двигателей внутреннего сгорания на электрические двигателей. Проведен сравнительный анализ преимуществ электродвигателей.

*Ключевые слова*: электродвигатель; энергосистема; эффективность; электротранспорт.

Развитие технологий проектирование электродвигателей для транспортных средств является уже несколько лет важным проектом для развитых стран по довольно очевидным причинам. В целом процесс электромобилестроения, главным образом в наиболее экономически развитых странах мира, успешно продвигается с разной интенсивностью и стадийностью, но в едином направлении совершенствования как технической и технологической основы конструктивного исполнения полностью электрифицированных колесных транспортных средств, так и эксплуатационной базы их применения. Оно уже сейчас, не говоря о ближайшем будущем, зависит от развитости энергосистемы, от которой потребуются дополнительные мегаватты электроэнергии, желательно не очень дорогой [1].

Рассмотрены асинхронные электродвигатели, так как их производство способствует повышению экономической и экологической ситуации в стране, поддерживает развитие научно-технического прогресса, содействует внедрению инновационных технологий.

Сфера эксплуатации асинхронных электрических машин в наши дни очень широка. Их используют в транспорте, промышленных станках, вентиляторах, насосах и в другом различном оборудовании, где нагрузка относительно стабильна или снижение количества оборотов не сильно влияет на рабочий процесс [2]. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором при работе от статического преобразователя частоты напряжения сочетает в себе достоинства наиболее простого тягового электродвигателя переменного тока с хорошими пусковыми и двигателя постоянного тока [3]. Пример это электромотора Tesla, у которого является преимущество в том, что ротор изготовлен из меди, что сильно повышает стоимость двигателя, но применение такого ротора в электротяговых установках оправдано большим

коэффициентом полезного действия (КПД) на 4,3% по сравнению с ротором из алюминия, большей стойкостью к высокой температуре и сроком службы. Недостатками асинхронных моторов как этот являются сложность и высокая цена изготовления ротора из меди, низкая эффективность на малых оборотах, меньший КПД по сравнению с синхронным электродвигателем [4].

Асинхронный электродвигатель состоит из двух основных частей: ротора, который вращается во время работы электродвигателя и неподвижного статора, установленного в корпусе. Каждая часть обладает принципом работы, позволяющим понять их функцию в строении асинхронного электродвигателя. В промышленности наиболее часто встречаются следующие схемы управления асинхронными электродвигателями:

- нереверсивного управления;
- реверсивного управления с двумя магнитными пускателями [5].

Также представляют интерес синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Поскольку обладают высоким КПД, порядка 94% и высоким отношением мощности к массе, больше единицы [6].

Электрические двигатели имеют ряд преимуществ перед дизельными (бензиновыми) в автомобилях, в частности, с точки зрения экономического эффекта:

- более низкие эксплуатационные расходы, что приводит к снижено затрат по сравнению на топливо;
- электромобили не производят вредных выбросов из выхлопной трубы, что способствует улучшению качества воздуха, а также экологической ситуации, особенно в городских районах.

Конструкция электромобиля более надежна, так как в нем минимальное количество движущихся частей и узлов. Существует несколько моделей электромобилей, собранных с двумя или более электродвигателями, это необходимо для того, чтобы приводить в движение каждое отдельное колесо или несколько одновременно, добиваясь увеличения тяги [7].

В современном мире необходим переход на электродвигатели тягового типа, так как с уверенностью можно сказать, что они превосходят двигатели внутреннего сгорания по всем параметрам. Так же сильным фактом, является то, что по обслуживанию и техническому вопросу, электродвигатели намного проще устроены [8].

## Библиографический список

1. Грушников, В. А. Актуальные проблемы автомобилизации. Электромобили / В. А. Грушников // Компетентность. – 2017. – № 8(149). – С. 22-29. – EDN ZVRFPB.

2. Армашова-Тельник, С. Г. Анализ преимущественных эффектов применения асинхронных электродвигателей в промышленном секторе / С. Г. Армашова-Тельник, Т. А. Бобович // Технологии и оборудование. – 2022. – № 5(87). – С. 30–35. – EDN DEF456.

3. Шарафутдинов, А. Р. Выбор электродвигателя для электромобилей и гибридных автомобилей / А. Р. Шарафутдинов, И. А. Старков // Техническая механика. – 2022. – № 8(128). – С. 11–19. – EDN PQR678.

4. Шарафутдинов, А. Р. Анализ асинхронных двигателей, используемых в электромобилях Tesla / А. Р. Шарафутдинов, И. А. Старков // Автомобили и электродвигатели. – 2022. – № 7(127). – С. 34–40. – EDN STU901.

5. Ферштадт, М. И. Управление работой двигателя электромобиля / М. И. Ферштадт, М. В. Сержантова // Компетентность. – 2023. – № 12(156). – С. 45-52. – EDN ABC123.

6. Салимоненко, Г. Н. Методика выбора тягового электродвигателя для электромобиля / Г. Н. Салимоненко, М. В. Назаров, А. В. Лопухов, А. А. Союстов // Автомобильная техника. – 2017. – № 4(102). – С. 18–25. – EDN GHI789.

7. Хамитова, А. М. Электродвигатель / А. М. Хамитова // Электротехника. – 2023. – № 5(153). – С. 12–18. – EDN EFG123.

8. Долгий, А. А. Электроавтомобили и их устройство / А. А. Долгий // Автомобили будущего. – 2022. – № 6(140). – С. 25–32. – EDN QRS345.

© Нзупет Чавуа А.Р., 2026

УДК 621.313

С.А. ПАХОМОВ
*pahomovsemenbest@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент З.Г. ГАБИДУЛЛИНА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ЭЛЕКТРОНАСОС БЫТОВОЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ

*Аннотация.* В статье рассмотрены конструкция и принцип работы электронасоса бытового центробежного БЦ-0,4-20-У1.1 «Агидель-М»; приведены технические характеристики агрегата. Описаны конструктивные особенности однофазного асинхронного электродвигателя, являющегося приводом насоса. Изложены требования к эксплуатации и техническому обслуживанию.

*Ключевые слова*: электронасос бытовой центробежный, однофазный асинхронный двигатель для центробежного насоса.

В Российской Федерации электронасосы «Агидель» нашли широкое применение среди дачников и владельцев приусадебных участков. Они применяются для перекачки воды из скважин, колодцев, а также открытых водоёмов: озёр, рек и прудов.

Электронасос бытовой центробежный БЦ-0,4-20-У1.1 «Агидель-М» предназначен для перекачки пресной воды из колодцев, открытых водоёмов и

скважин. Агрегат соответствует требованиям ГОСТ 26287-84 «Электронасосы бытовые. Общие технические условия» [2]. Согласно данному стандарту, электронасос относится к классификационной группе центробежных бытовых электронасосов (тип Ц) переносного исполнения с продолжительным номинальным режимом работы.

Условия эксплуатации агрегата: максимальная температура перекачиваемой воды – до +35 °С; температура окружающей среды – от +1 до +40 °С; относительная влажность воздуха – до 95 % при температуре +25 °С; высота над уровнем моря – не более 1000 м [3].

Технические характеристики электронасоса БЦ-0,4-20-У1.1 «Агидель-М» приведены в таблице 1 [3].

Электронасос представляет собой моноблок, состоящий из электродвигателя и центробежного насоса. Корпус и крыльчатка насосной части изготовлены из алюминиевого сплава, рекомендованного для контакта с пищевыми продуктами. Конструкция предусматривает двойную защиту от протечек со стороны насосной части [3].

Условное обозначение агрегата расшифровывается следующим образом: Б – электронасос бытовой; Ц – центробежный; 0,4 – объёмная подача, $n \times 10^3$ м$^3$/с; 20 – номинальный напор, м; У1.1 – климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69 [3].

*Таблица 1*

Технические характеристики БЦ-0,4-20-У1.1 «Агидель-М»

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Номинальный напор (не менее), м | 20 |
| Номинальная подача (при напоре 20 м, не менее), л/ч | 1440 |
| Максимальный напор (не менее), м | 22 |
| Максимальная подача (не менее), м³/ч | 2,9 |
| Высота всасывания (не более), м | 8 |
| Потребляемая мощность, Вт | 370 (+15%) |
| Напряжение питающей сети, В | 220 ± 10% |
| Частота тока, Гц | 50 |
| Степень защиты | IP24 |
| Рабочее положение | вертикальное |
| Масса нетто, кг | 5,6 |
| Габаритные размеры (высота × диаметр), мм | 254 × 238 |

Модельный ряд насосов состоит из «Агидель-М» (малогабаритный электронасос, используемый для подачи воды с небольшой глубины до 8 м и на небольшие расстояния; выпускается в вертикальном, горизонтальном и универсальном формате) и «Агидель-10» (насос средней мощности самовсасывающего типа, способный поднимать воду из колодца или скважины глубиной до 7 м; выпускается только в горизонтальном исполнении). Оба варианта насосов серии «Агидель» оснащены нагнетательным механизмом центробежного типа, который приводится в движение однофазным асинхронным электродвигателем, работающим от электросети 220 В, частотой 50 Гц [1].

Электродвигатель, служащий приводом насоса, состоит из следующих основных узлов: статора, в который встроен термопредохранитель, предохраняющий обмотку статора от перегрева; ротора с короткозамкнутой обмоткой типа «беличья клетка»; подшипникового щита; фланца [4].

В однофазных асинхронных двигателях статор создаёт пульсирующую магнитодвижущую силу, которую можно рассматривать как две вращающиеся в противоположные стороны составляющие. Для создания пускового момента применяется схема с пусковой или рабочей конденсаторной обмоткой, смещённой относительно главной обмотки. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к установившейся, вспомогательная обмотка отключается [4].

Электродвигатель рассчитан на длительный режим работы. Термопредохранитель обеспечивает автоматическое отключение при превышении допустимой температуры обмоток [5].

Согласно ГОСТ 26287-84, номинальный напор бытовых электронасосов должен соответствовать ряду значений: 8; 12; 16; 18; 20; 25; 32; 40; 50; 63 м. Вакуумметрическая высота всасывания для центробежных электронасосов должна быть не менее 5 м при номинальных параметрах. Напряжение питания электронасосов – 220 В ± 10 %, частота – 50 Гц [2].

Стандарт устанавливает, что ресурс электронасосов с приводом от асинхронного электродвигателя должен составлять не менее 2000 ч. Устройство безопасности электронасоса, если таковое имеется, должно обеспечивать защиту при перегрузках и ненормальной работе. Переносные электронасосы должны быть устойчивы к механическим воздействиям при эксплуатации и соответствовать группе условий эксплуатации М23 по ГОСТ 17516.1 [2].

Электронасосы марки «Агидель» необходимо устанавливать на твёрдой ровной поверхности. Для защиты от атмосферных осадков и прямых солнечных лучей рекомендуется сооружать специальные укрытия или устанавливать агрегаты в подсобных помещениях. Расстояние от дна водоёма до приёмного клапана должно быть не менее 0,3 м [5].

Подключение насоса требует предварительной заливки системы водой. Электронасос является надёжным агрегатом, не требующим специального обслуживания на протяжении всего ресурса. При необходимости гарантийного

и послегарантийного ремонта (износ манжет, выход из строя статора, замена смазки в подшипниках) следует обращаться на предприятия бытового обслуживания [5].

Завод-изготовитель гарантирует безотказную работу электронасоса при правильном уходе и нормальной эксплуатации в течение 30 месяцев со дня продажи через розничную торговую сеть. Стоимость электронасосов «Агидель» в сравнении с импортными аналогами ниже в 2–5 раз, а по производительности, надёжности и долговечности они незначительно уступают мировым аналогам [1].

Выбор типа электродвигателя для привода бытового центробежного насоса определяется совокупностью технических, эксплуатационных и экономических требований. В сравнении с коллекторными электродвигателями однофазный асинхронный двигатель имеет принципиальное преимущество: ток в роторе возникает без контактного взаимодействия, что исключает применение скользящих контактов – щёток и коллектора. Это повышает надёжность устройства, снижает износ и упрощает техническое обслуживание, что критически важно для бытового оборудования, эксплуатируемого без постоянного надзора [4].

Конденсаторные однофазные двигатели – наиболее распространённый тип привода для насосов, компрессоров кондиционеров и вентиляторов – обеспечивают удовлетворительный пусковой момент при питании от однофазной сети. Требуемая мощность привода насоса БЦ-0,4-20-У1.1 составляет 370 Вт, что полностью соответствует диапазону мощностей однофазных асинхронных двигателей, применяемых в бытовой технике [1].

Дополнительным аргументом в пользу данного типа двигателя служит отсутствие необходимости в пусковом реостате или автотрансформаторе: электронасос «Агидель-М» комплектуется штепсельным разъёмом и подключается непосредственно к бытовой розетке. Таким образом, однофазный асинхронный двигатель является безальтернативным техническим решением для привода бытового центробежного насоса с питанием от сети 220 В [2].

Основной проблемой, возникающей при проектировании таких двигателей, является следующее: при перемотке или замене статора в условиях ремонтного производства нередко утрачиваются заводские данные обмотки (число витков, диаметр провода, схема укладки, шаг обмотки). Восстановление этих данных без инженерного расчёта приводит к несоответствию электромагнитных характеристик двигателя паспортным значениям: завышенному или заниженному пусковому моменту, перегреву обмоток, снижению КПД и ресурса [3].

Для решения данной проблемы в рамках проектирования предполагается выполнить следующие этапы расчёта.

1. Определить число пазов статора ($Z$) и число полюсов ($2p$), исходя из синхронной частоты вращения 3000 об/мин при частоте сети 50 Гц.

2. Рассчитать полюсное деление, шаг обмотки, коэффициенты распределения и укорочения главной и вспомогательной обмоток.

3. Определить число витков в катушке и диаметр обмоточного провода, обеспечивающие номинальную потребляемую мощность 370 Вт при напряжении 220 В.

4. Проверить тепловой режим обмотки статора на допустимое превышение температуры в соответствии с классом нагревостойкости изоляции.

5. Подобрать параметры конденсатора пусковой цепи, обеспечивающего необходимый пусковой момент для самозапуска насоса под нагрузкой [4].

Результатом проектирования должна стать конструкторская документация обмотки статора, пригодная для использования при изготовлении или ремонте электродвигателя насоса в соответствии с требованиями ГОСТ 26287-84.

В заключение, можно сделать вывод, что электронасос бытовой центробежный БЦ-0,4-20-У1.1 «Агидель-М» представляет собой надёжный и доступный агрегат моноблочной конструкции для бытового водоснабжения. Его технические характеристики и конструктивные решения полностью соответствуют требованиям ГОСТ 26287-84. Привод от однофазного асинхронного электродвигателя с термозащитой обеспечивает длительный ресурс работы не менее 2000 ч. Область применения охватывает подачу воды из колодцев, открытых водоёмов и неглубоких скважин глубиной до 8 м для нужд орошения и водоснабжения индивидуальных домовладений.

**Библиографический список**

1. Соколов Е.Я. Водяные насосы. — М.: Энергоатомиздат, 2006. — 248 с.

2. ГОСТ 26287-84. Электронасосы бытовые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 32 с.

3. Электронасос бытовой центробежный БЦ-0,4-20-У1.1 «Агидель-М». Руководство по эксплуатации. ТУ 1-91 8Г2.940.007ТУ. – Уфа: УАПО, 2024.

4. Москаленко В.В. Электрический привод: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. – М.: Академия, 2007. — 368 с.

5. ГОСТ 27570.0-87. Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Общие требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1987.

© Пахомов С.А., 2026

УДК 621.313:62-756

Ф.А. САХИЯРОВ, И.А. КУТДУСОВ
*Sahiarov2015@yandex.ru*
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доцент О.А. ЮШКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПРИЧИНЫ ПЕРЕГРЕВА ОБМОТОК СТАТОРА И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ

*Аннотация*. В работе рассмотрены основные причины перегрева обмоток статора электромеханических систем, проанализировано влияние повышенной температуры на изоляцию и надежность оборудования. Приведены основные методы контроля и предотвращения перегрева, позволяющие повысить срок службы электромеханических систем.

*Ключевые слова*: электромеханическая система; обмотка статора; перегрев; изоляция; ток; тепловой режим; надежность.

Перегрев обмоток статора является одной из наиболее распространённых и опасных проблем, возникающих в электрических машинах переменного тока, особенно в асинхронных и синхронных двигателях. Повышение температуры обмоток приводит к ускоренному старению изоляции, снижению её электрической прочности и, как следствие, к пробоям, межвитковым замыканиям и выходу машины из строя. Поэтому понимание причин перегрева и методов его контроля имеет важное значение для надёжной и долговечной работы электрических машин.

Основной причиной нагрева обмоток статора является электрические потери, возникающие при протекании тока через проводники. Эти потери включают в себя потери в меди, которые пропорциональны квадрату тока и сопротивлению обмотки. При увеличении нагрузки двигателя ток в обмотках возрастает, что приводит к росту тепловыделения. Если двигатель работает в режиме перегрузки длительное время, температура обмоток может превысить допустимые значения, рассчитанные по классу изоляции.

Дополнительным фактором является ухудшение условий охлаждения. В большинстве электрических машин охлаждение осуществляется за счёт вентиляции, создаваемой встроенным вентилятором на валу двигателя или внешними системами охлаждения. Засорение вентиляционных каналов, накопление пыли на поверхности корпуса или выход из строя вентилятора значительно снижают эффективность теплоотвода. В результате тепло накапливается внутри машины, и температура обмоток начинает стремительно расти даже при нормальной нагрузке. Также важную роль играют магнитные потери в стали статора, возникающие из-за перемагничивания сердечника. Эти потери включают гистерезисные и вихревые токи, которые также преобразуются

в тепло. При повышении напряжения питания выше номинального или при искажении формы напряжения (например, из-за работы с частотными преобразователями без фильтрации) магнитные потери существенно увеличиваются, что дополнительно нагревает обмотки.

Нельзя не учитывать и влияние качества самой обмотки. Наличие дефектов изоляции, неправильная укладка проводников, ослабление межвитковой изоляции или старение материалов приводит к локальным перегревам. Такие зоны перегрева особенно опасны, так как они не всегда равномерно распределяются и могут привести к локальному пробою даже при нормальной средней температуре машины. Особое место занимает режим работы двигателя. Частые пуски, торможения и реверсы вызывают значительные переходные токи, которые многократно превышают номинальные значения. В эти моменты обмотки испытывают кратковременные, но интенсивные тепловые нагрузки. Если такие режимы повторяются слишком часто, система охлаждения не успевает отводить тепло, и происходит накопление тепловой энергии.

Методы контроля температуры обмоток статора играют ключевую роль в обеспечении надёжной работы электрических машин и предотвращении аварийных режимов. Наиболее распространённым способом контроля является применение встроенных температурных датчиков, которые размещаются непосредственно в пазах статора или вблизи наиболее нагреваемых зон. В качестве таких датчиков используются термопары, терморезисторы (PTC и NTC), а также термосопротивления типа Pt100. Они позволяют непрерывно отслеживать температуру и передавать сигнал в систему защиты или управления.

В современных электроприводах широко применяются системы тепловой защиты, основанные на модели нагрева двигателя. Такие системы учитывают ток нагрузки, время работы и тепловую постоянную машины. На основе этих данных рассчитывается виртуальная температура обмоток, которая позволяет заранее предсказать перегрев даже без прямого измерения температуры. Это особенно важно в случаях, когда установка датчиков затруднена или невозможна. Дополнительным методом контроля является использование тепловизионной диагностики. Тепловизоры позволяют бесконтактно определить распределение температуры по поверхности корпуса двигателя. По тепловой карте можно выявить зоны локального перегрева, которые часто указывают на дефекты обмотки, ухудшение охлаждения или неравномерность нагрузки. Такой метод особенно эффективен при профилактических осмотрах и обслуживании оборудования.

Важную роль играет также контроль электрических параметров двигателя. Повышение тока, перекос фаз, снижение коэффициента мощности и увеличение потерь могут косвенно указывать на начинающийся перегрев. Поэтому в современных системах автоматизации широко используются реле защиты, анализаторы сети и частотные преобразователи с функцией тепловой защиты двигателя.

Предотвращение перегрева обмоток статора основывается не только на контроле, но и на правильной эксплуатации электрических машин. Важным фактором является обеспечение нормальных условий охлаждения. Регулярная очистка вентиляционных каналов, контроль работы вентиляторов и обеспечение свободного доступа воздуха к корпусу двигателя позволяют значительно снизить риск перегрева.

Также необходимо соблюдать режимы нагрузки, не допуская длительной работы двигателя в перегруженном состоянии. При проектировании систем электропривода важно правильно подбирать мощность двигателя с учётом реальных условий эксплуатации, включая возможные пусковые перегрузки и характер нагрузки.

К дополнительным мерам относится использование качественных изоляционных материалов с высоким классом термостойкости, а также регулярное техническое обслуживание оборудования. Своевременная диагностика позволяет выявить начальные стадии деградации изоляции и предотвратить аварийные ситуации.

Таким образом, перегрев обмоток статора является комплексной проблемой, связанной как с электрическими и магнитными потерями, так и с условиями охлаждения и эксплуатацией машины. Эффективное сочетание методов контроля и профилактики позволяет значительно повысить надёжность электрических машин и увеличить срок их службы.

## Библиографический список

1. Копылов И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. – Москва: Высшая школа, 2010.

2. Вольдек А. И. Электрические машины : учебник для вузов / А. И. Вольдек. – Санкт-Петербург : Питер, 2012.

3. Кузнецов Н. Ф. Электрические машины и трансформаторы: учебное пособие / Н. Ф. Кузнецов. – Москва : Энергоатомиздат, 2008.

4. Иванов А. И. Надёжность и диагностика электрических машин / А. И. Иванов. – Москва : Энергоиздат, 2015.

5. .Федотов В. А. Тепловые процессы в электрических машинах : учебное пособие / В. А. Федотов. – Москва : Издательство МЭИ, 2011.

6. ГОСТ 183–74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное : утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР : дата введения 1975-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2008.

7. ГОСТ IEC 60034-1–2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные данные и характеристики: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии: дата введения 2015-09-01. – Москва : Стандартинформ, 2015.

© Сахияров Ф.А., Кутдусов И.А., 2026

УДК 621.314.222.6, 621.314.223, 621.317.7

И.А. ЩЕКАТУРОВ
*sekaturovila@gmail.com*
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доцент Д.Ю. ПАШАЛИ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ К ГЕОИНДУЦИРОВАННЫМ ТОКАМ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И АКТИВНОЙ ЧАСТИ

*Аннотация*. В статье рассматривается проблема воздействия геоиндуцированных токов (ГИТ) на силовые трансформаторы как одного из факторов, снижающих надежность электроэнергетических систем и методы повышения устойчивости.

*Ключевые слова*: силовой трансформатор, геоиндуцированные токи, предиктивная аналитика, цифровой двойник, мониторинг состояния.

В условиях цифровой трансформации электроэнергетики и роста доли оборудования, выработавшего нормативный срок службы, особую остроту приобретают вопросы надежности силовых трансформаторов [1]. Традиционно системы защиты ориентированы на отключение токов короткого замыкания и перегрузок промышленной частоты. Однако практика показывает, что значительный ущерб оборудованию наносят геоиндуцированные токи, возникающие в длинных воздушных линиях электропередачи во время геомагнитных бурь [1].

Актуальность исследования определяется совпадением двух критических факторов: старением парка силовых трансформаторов и нарастанием внешних климатических и электромагнитных угроз для энергосистем. Проблема старения оборудования остается острой для отечественной электроэнергетики на протяжении десятилетий. Согласно опубликованным исследованиям, еще по состоянию на 2000 год доля оборудования подстанций 110/220 кВ, прослужившего более 25 лет (нормативный срок по ГОСТ 11677-85), составляла 40%, а в электрических сетях этот показатель достигал 32% [2]. К настоящему времени, с учетом темпов модернизации, значительная часть парка продолжает эксплуатироваться за пределами нормативных сроков, что создает предпосылки для роста аварийности.

Частота ГИТ (доли герц) значительно ниже номинала сети, что делает их эквивалентными постоянному току для силовых автотрансформаторов. Это вызывает насыщение магнитной системы, лавинообразный рост тока намагничивания и перегрев конструктивных элементов [1]. Статистика аварийности в сетях высокого напряжения 220 кВ и выше свидетельствует о

недостаточной эффективности существующих решений и необходимости внедрения специализированных средств защиты.

Современные методы оценки состояния трансформаторов делятся на инвазивные и неинвазивные. Инвазивные методы диагностики трансформаторов представляют собой процедуры, требующие прямого вмешательства в конструкцию оборудования, подключения датчиков к токоведущим частям или отбора проб рабочих материалов (масла, газа). Значительный прогресс достигнут в области неинвазивных измерений – метод анализа диаграммы *ΔV-Iin* позволяет с точностью до 98,5% идентифицировать внутренние короткие замыкания без внедрения дополнительного оборудования внутрь бака [3]. Он отображает зависимость между изменением напряжения и входным током (рисунок 1).

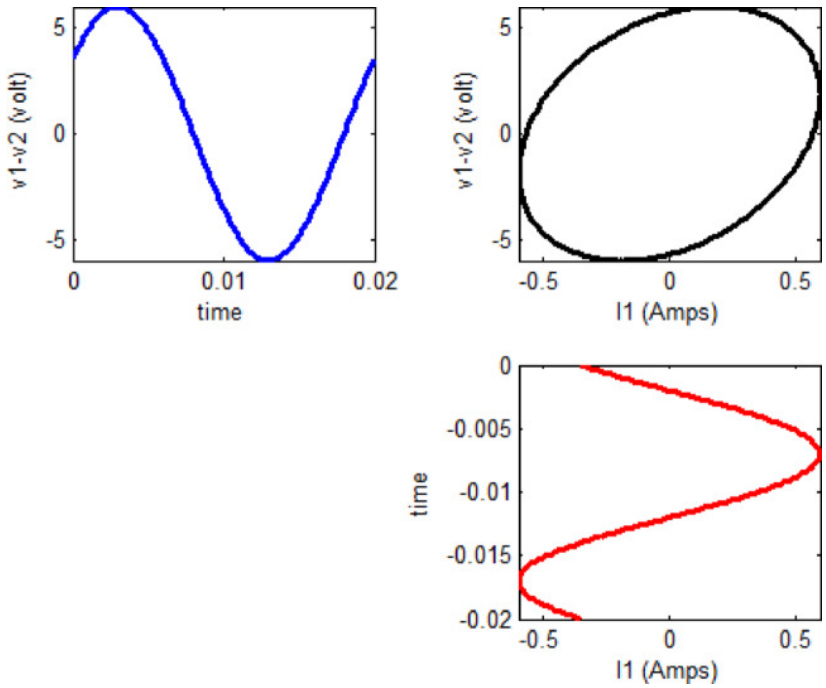



*Рис. 1. ΔV-Iin* диаграмма

Альтернативным направлением является анализ пространственного распределения магнитного поля рассеяния с применением метода опорных векторов и разреженных сенсорных сетей. График (рис. 2) показывает, что по мере приближения к точке повреждения плотность магнитного потока в измерительной области обмотки возрастает, достигая максимального значения при определенном количестве витков повреждения. Результаты показывают, что по мере приближения места повреждения к измерительной области плотность магнитного потока увеличивается, достигая пика в месте витков повреждения. В поврежденном состоянии сигнал во временной области демонстрирует более высокую амплитуду и более частые колебания, чем в среднем. Следовательно, информация о временной области и пиковой амплитуде сигнала утечки магнитного потока может служить входными признаками для алгоритмов определения места повреждения при обнаружении

короткого замыкания в обмотках трансформатора. Точность локализации межвитковых замыканий такими системами может достигать 97,4%, что подтверждает высокий потенциал масштабирования технологий магнитной диагностики [4].

Однако данные методы фокусируются на внутренних дефектах обмоток и не решают задачу раннего предупреждения аномальных режимов, вызванных внешними электромагнитными воздействиями природного характера.

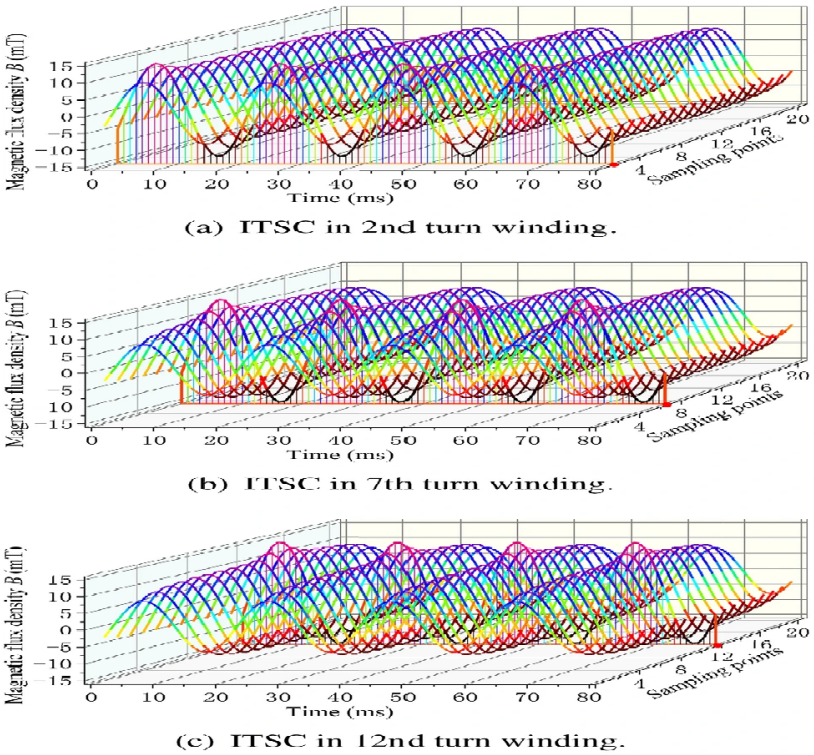



*Рис. 2.* Распределение магнитного потока в различных местах повреждения

Для предотвращения аварий, аналогичных системной катастрофе в энергосистеме *Hydro-Québec* (1989 г.) [5], предлагается трехуровневая архитектура защиты: уровень сбора данных, исполнительный уровень и аналитический уровень.

На уровне сбора данных будет происходить развертывание сети геофизического мониторинга для регистрации вариаций геомагнитного поля и расчета прогнозных уровней ГИТ в нейтралях трансформаторов [1]. Исполнительный уровень будет заключаться во внедрении полупроводниковых блокираторов постоянного тока на основе достижений силовой электроники, устанавливаемых в цепь заземления нейтрали и предотвращающих подмагничивание магнитопровода [1]. На аналитическом уровне будет производится интеграция данных мониторинга с цифровыми двойниками. Цифровой двойник позволяет не просто фиксировать текущие параметры, но и прогнозировать скорость деградации изоляции под воздействием тепловых перегрузок, планируя обслуживание по фактическому состоянию [6].

Предлагаемая методика базируется на полевых расчетах электромагнитных процессов в пространственной магнитной системе трансформатора. Для оценки устойчивости обмоток к динамическим воздействиям при насыщении сердечника применяется метод пространственного моделирования распределения магнитных полей [7]. Это позволяет верифицировать эффективность блокираторов на этапе проектирования без натурных испытаний в энергосистеме. С точки зрения управления режимами, внедрение гибридных (*smart hybrid*) трансформаторов, сочетающих традиционную электромагнитную часть с силовыми электронными преобразователями, открывает возможности для активного подавления гармоник и компенсации реактивной мощности при возмущениях в сети.

Повышение надежности силовых трансформаторов в условиях роста внешних электромагнитных угроз требует отхода от исключительно релейных методов защиты. Создание комплексной системы, объединяющей геофизический мониторинг, физическое блокирование геоиндуцированных токов и технологии искусственного интеллекта (предиктивная аналитика), позволяет минимизировать ущерб от природных воздействий и продлить срок службы парка силовых трансформаторов.

**Библиографический список**

1. В ТГУ разработан метод защиты силовых трансформаторов [Электронный ресурс] // URL: https://www.informio.ru/news/id45774/V-TGU-razrabotan-metod-zashity-silovyh-transformatorov (дата обращения: 27.04.26)

2. Диагностика силовых трансформаторов [Электронный ресурс] // URL: https://npa.transform.ru/articles/html/06exploitation/expl000092.html (дата обращения: 28.04.26)

3. Condition monitoring and fault diagnosis of power transformer based on non-invasive measurement [Электронный ресурс] // URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40890206 (дата обращения: 28.04.26)

4. A fault diagnosis method for inter-turn short circuit based on magnetic field distribution [Электронный ресурс] // URL: https://www.nature.com/articles/s41598-025-01760-2 (дата обращения: 28.04.26)

5. March 1989 geomagnetic storm [Электронный ресурс] // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/March_1989_geomagnetic_storm (дата обращения: 29.04.26)

6. В НовГУ рассказали о цифровом двойнике трансформатора, предсказывающем поломки [Электронный ресурс] // URL: https://www.elec.ru/news/2025/11/28/v-novgu-rasskazali-o-cifrovom-dvojnike-transformat.html (дата обращения 29.04.26)

7. Анализ электромагнитных процессов в трансформаторах с пространственной магнитной системой [Электронный ресурс] // URL: https://eepir.ru/article/analiz-elektromagnitnyh-processov-v-transformatorah-s-prostranstvennoj-magnitnoj-sistemoj/ (дата обращения 29.04.26)

© Щекатуров И.А., 2026

УДК 621.313:615.8

А.А. ЩЕРБАКОВА
*Vydra24@yandex.ru*
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент М.Б. ГАРЕЕВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# РАЗРАБОТКА ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА ПАССИВНОЙ РАЗРАБОТКИ ЛОКТЕВОГО СУСТАВА

*Аннотация*. В статье рассматривается разработка сервопривода для реабилитационного тренажёра пассивной разработки локтевого сустава, предназначенного для восстановления двигательных функций верхних конечностей у военнослужащих после травм. Обоснован выбор конструкции двигателя, приведены его основные технические характеристики.

*Ключевые слова*: сервопривод, электродвигатель, реабилитация, локтевой сустав, медицинская техника.

В условиях увеличения числа травм верхних конечностей у военнослужащих возрастает необходимость разработки эффективных средств реабилитации. Одним из перспективных направлений является создание тренажёров пассивной разработки суставов, позволяющих выполнять движения без участия мышечной активности пациента. Особую роль в таких устройствах играет электропривод, обеспечивающий точность, плавность и безопасность движения. Использование сервоприводов позволяет реализовать контролируемые режимы работы, адаптированные под индивидуальные особенности пациента.

В условиях увеличения числа травм верхних конечностей у военнослужащих возрастает необходимость разработки эффективных средств реабилитации. Одним из перспективных направлений является создание тренажёров пассивной разработки суставов, позволяющих выполнять движения без участия мышечной активности пациента. Особую роль в таких устройствах играет электропривод, обеспечивающий точность, плавность и безопасность движения. Использование сервоприводов позволяет реализовать контролируемые режимы работы, адаптированные под индивидуальные особенности пациента.

В условиях увеличения числа травм верхних конечностей у военнослужащих возрастает необходимость разработки эффективных средств реабилитации. Одним из перспективных направлений является создание тренажёров пассивной разработки суставов, позволяющих выполнять движения без участия мышечной активности пациента. Особую роль в таких устройствах играет электропривод, обеспечивающий точность, плавность и безопасность движения. Использование сервоприводов позволяет реализовать

контролируемые режимы работы, адаптированные под индивидуальные особенности пациента.

*Таблица 1*

Технические характеристики двигателя

| № п/п | Параметр | Ед. изм. | Значение |
|---|---|---|---|
| 1 | Тип двигателя | - | Сервопривод |
| 2 | Напряжение | В | 24 |
| 3 | Мощность | Вт | 100 |
| 4 | Скорость | об/мин | 0–60 |
| 5 | Угол движения | град | 0–140 |

Разработанный двигатель обеспечивает требуемые параметры движения и может быть использован в составе медицинских реабилитационных комплексов. Применение подобных решений способствует сокращению сроков восстановления пациентов и повышению эффективности лечения.

Разработанный двигатель обеспечивает требуемые параметры движения и может быть использован в составе медицинских реабилитационных комплексов. Применение подобных решений способствует сокращению сроков восстановления пациентов и повышению эффективности лечения.

Разработанный двигатель обеспечивает требуемые параметры движения и может быть использован в составе медицинских реабилитационных комплексов. Применение подобных решений способствует сокращению сроков восстановления пациентов и повышению эффективности лечения.

## Библиографический список

1. Гехт Б.М. Медицинская реабилитация. – М., 2021.

2. Кузнецов В.В. Электропривод. – СПб., 2020.

3. Иванов А.С. Роботизированные комплексы // Медицинская техника. 2023.

© Щербакова А.А., 2026

УДК 621.86

А.С. СЕРГЕЕВ
*aleksandr_r2012@mail.ru*
Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент А.В. СТЫСКИН

***Уфимский университет науки и технологий***

# АНАЛИЗ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОТКАТНЫХ ВОРОТ

*Аннотация*. В данной статье рассматриваются актуальные вопросы, связанные с применением и развитием электроприводов для откатных ворот. Проанализированы основные преимущества автоматизированных систем перед ручным управлением, заключающиеся в повышении комфорта и безопасности передвижения. Дано описание классической конструкции откатных ворот и их кинематической схемы.

*Ключевые слова*: электропривод, откатные ворота, автоматизация, система управления, программируемый логический контроллер (ПЛК), датчики безопасности, удаленное управление, Интернет вещей (IoT).

Современный темп жизни диктует необходимость повсеместной автоматизации процессов, и сфера обеспечения контроля доступа на территорию частных владений и промышленных объектов не является исключением. Откатные ворота, благодаря своей надежной и практичной конструкции, получили широкое распространение. Однако их ручное использование сопряжено с рядом неудобств, особенно в неблагоприятных погодных условиях. Решение этой проблемы заключается в оснащении ворот автоматизированными электроприводами, что значительно повышает уровень комфорта, безопасности и престижа объекта.

Целью данной работы является анализ конструктивных особенностей, принципа действия и современных тенденций развития электроприводов для откатных ворот.

## Конструкция кинематики откатных ворот

Основой конструкции является полотно ворот, которое перемещается вдоль линии забора по направляющей балке, установленной на роликовых тележках. Кинематическая схема привода представляет собой последовательную систему: «электродвигатель -> понижающий редуктор -> ведущая звездочка (или шестерня) -> зубчатая рейка, жестко закрепленная на полотне ворот». Такая схема обеспечивает преобразование вращательного движения вала двигателя в поступательное движение полотна с необходимым усилием.

**Ключевые компоненты системы электропривода**

Современный электропривод для откатных ворот представляет собой сложную мехатронную систему, в состав которой входят:

**1. Силовой блок**: асинхронный или коллекторный электродвигатель, обеспечивающий необходимое усилие для перемещения полотна.

**2. Передаточный механизм:** червячный или планетарный редуктор, предназначенный для увеличения крутящего момента и снижения скорости вращения выходного вала.

**3. Система управления:** ядро системы на основе микроконтроллера или программируемого логического контроллера (ПЛК). Именно этот блок обрабатывает команды пользователя и сигналы от датчиков, управляя включением/выключением двигателя и его реверсом.

**4. Датчики безопасности:** комплекс датчиков, обеспечивающих безопасную эксплуатацию:

– фотоэлектрические датчики («фотоэлементы»): блокируют закрывание при обнаружении препятствия в проеме;

– датчики концепции положений: Механические или магнитные сенсоры, подающие сигнал о положении полотна в крайних позициях (полностью открыто/крыто);

– датчик усилия (обнаружения препятствия): анализирует ток двигателя. При резком возраста тока (возникшем, например, при наезде на препятствие) подает команду на остановку и реверс.

**Современные тенденции и перспективы развития**

Развитие электроприводов для ворот по пути повышения интеллекта, энергоэффективности и интеграции в более крупные системы:

1. Удаленное управление и IoT: интеграция GSM-модулей позволяет управлять воротами с мобильного телефона посредством SMS или голосового вызова. Более современный тренд — использование модулей Wi-Fi и подключение к IoT-платформам (например, Яндекс Алиса, Google Home), что обеспечивает управление через мобильное приложение из любой точки мира.

2. Энергоэффективность: применение бесколлекторных (DC) двигателей позволяет существенно снизить энергопотребление, повысить КПД и увеличить срок службы привода за счет отсутствия щеточно-коллекторного узла.

3. Интеллектуальные алгоритмы: реализация функций самодиагностики, которая оповещает пользователя о необходимости технического обслуживания (например, смазки рейки), а также адаптивных алгоритмов, подстраивающих мощность привода под зимние условия (снег, лед).

В таблице 1 приведено сравнение типов электроприводов для откатных ворот.

*Таблица 1*

| Характеристика | Коллекторный двигатель | Асинхронный двигатель | Бесколлекторный (BLDC) двигатель |
|---|---|---|---|
| Принцип работы | Вращение ротора за счет взаимодействия магнитного поля статора и ротора, коммутируемого щетками. | Вращение ротора за счет индукции магнитного поля статора. | Вращение ротора за счет взаимодействия магнитных полей статора и ротора, управляемого электроникой. |
| Надежность | Средняя (износ щеток) | Высокая | Очень высокая (отсутствие изнашивающихся частей) |
| Энергоэффективность | Низкая | Средняя | Высокая |
| Срок службы | Средний (ограничен износом щеток) | Длительный | Очень длительный |
| Стоимость | Низкая | Средняя | Высокая |
| Уровень шума | Средний | Низкий | Низкий |
| Управление скоростью | Простое, но с ограничениями | Требует частотного преобразователя | Высокоточное, плавное |
| Применение в приводах | Бюджетные модели, легкие ворота | Наиболее распространенный тип, средние и тяжелые ворота | Премиальные модели, требовательные к энергоэффективности и сроку службы |

**Перспективы развития и интеграция в экосистемы**

Дальнейшее развитие электроприводов для откатных ворот неразрывно связано с концепцией "Умного дома" и Интернета вещей (IoT). Интеграция с системами домашней автоматизации позволяет не только управлять воротами удаленно, но и создавать сценарии их работы в зависимости от различных факторов. Например, ворота могут автоматически открываться при приближении автомобиля владельца, идентифицированного по номеру или через Bluetooth-соединение смартфона. Также возможно создание сценариев, когда ворота закрываются автоматически после выезда последнего автомобиля из гаража или при постановке дома на охрану.

Важным направлением является развитие систем искусственного интеллекта и машинного обучения для электроприводов. Это позволит не только оптимизировать энергопотребление и повысить надежность, но и прогнозировать возможные неисправности до их возникновения. Например, система может анализировать характер нагрузки на двигатель и редуктор, выявлять аномалии в работе и заблаговременно предупреждать пользователя о необходимости проведения технического обслуживания. Это значительно снизит риск внезапного выхода оборудования из строя и продлит срок его службы.

Кроме того, наблюдается тенденция к стандартизации протоколов связи и интерфейсов, что позволит беспрепятственно интегрировать приводы от различных производителей в единую экосистему управления объектом. Это даст пользователям большую свободу выбора и возможность создавать комплексные решения, отвечающие их индивидуальным потребностям. Развитие технологий беспроводной связи, таких как 5G, откроет новые возможности для высокоскоростной передачи данных и более надежного удаленного управления, что особенно актуально для промышленных объектов и крупных территорий.

Внедрение технологий дополненной реальности (AR) также может найти применение в сфере обслуживания и диагностики электроприводов. Специалисты смогут использовать AR-очки для получения пошаговых инструкций по ремонту или настройке, а также для визуализации внутренних компонентов системы в режиме реального времени. Это ускорит процесс обслуживания и снизит вероятность ошибок.

Таким образом, электроприводы для откатных ворот перестают быть просто механическими устройствами и превращаются в интеллектуальные компоненты современных автоматизированных систем, играя важную роль в обеспечении комфорта, безопасности и эффективности управления доступом.

**Заключение**

Проведенный анализ показывает, что электроприводы для откатных ворот эволюционируют от простых исполнительных механизмов в сложные, интеллектуальные и связанные системы. Основные векторы развития направлены на обеспечение максимальной надежности, безопасности пользователя и интеграцию в концепцию «Умного дома». Дальнейшие перспективы связаны с внедрением более совершенных алгоритмов машинного обучения для прогнозирования нагрузки и превентивного обслуживания, а также с развитием стандартов для беспрепятственной интеграции устройств от разных производителей в единую экосистему управления объектом.

## Библиографический список

1. Пет В.К. Автоматизированные системы управления электроприводами. – М.: изд-во «Академия», 2020. – 256.

2. Сидоров А.Н., Кузнецов Е.В. Мехатронные системы бытового и промыш назначения. – СПб.: Лань, 2022. – 320 с.

3. Официальный сайт компании «CAME» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.came.com.

4. Образец УУНИТ: Цифровизация и информационные технологии – 2025 [Электронный ресурс]. – У: УУНИТ.

© Сергеев А.С., 2026

УДК 621.033.333

А.М. ШАКИРОВ
*yantand@gmail.com*
Научный руководитель – канд. техн. наук, доц. А.В. ЛОБАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ

*Аннотация*. В статье рассматривается выбор асинхронного двигателя для компрессорной установки мощностью 50 кВт. Приводится анализ требований компрессорной нагрузки, сравнение серийных моделей и обоснование выбора прототипа с высоким классом энергоэффективности.

*Ключевые слова*: Асинхронный двигатель, компрессорная установка, 50 кВт, энергоэффективность, IE3, пусковой момент.

Электропривод компрессорных установок является одним из основных потребителей электроэнергии в промышленности. На долю асинхронных двигателей приходится более 70 % всей потребляемой энергии, поэтому вопросы повышения их энергоэффективности и адаптации к специфическим нагрузкам имеют критическое значение. Поршневые и винтовые компрессоры предъявляют к приводу особые требования: высокий пусковой момент (1,5–2,5 от номинального), устойчивость к циклическим нагрузкам, продолжительный режим работы S1 и возможность регулирования производительности. Мощность 50 кВт является наиболее востребованной в сегменте средних промышленных компрессоров, используемых для питания цеховых пневмосетей, холодильных установок и технологических линий.

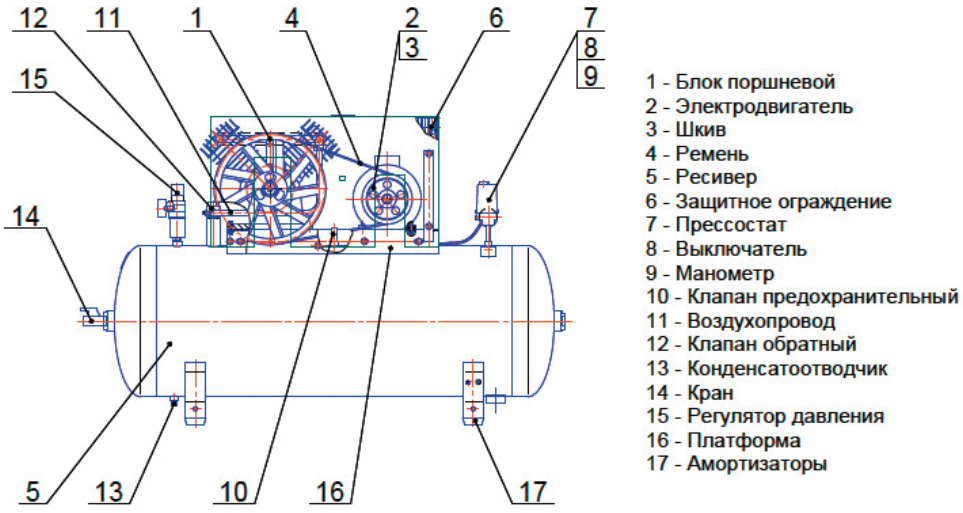



*Рис. 1.* Типовая конструкция асинхронного двигателя для компрессорной установки

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором занимают доминирующее положение благодаря простоте конструкции, низкой стоимости обслуживания и высокой надежности. Однако при работе с компрессорной нагрузкой возникает ряд проблем: завышенное энергопотребление из-за неоптимального КПД в рабочей точке, повышенные пусковые токи, вызывающие просадки напряжения, перегрев изоляции и повышенный износ механических частей. Поэтому выбор или проектирование двигателя должны выполняться с учётом реального характера нагрузки.

**Сравнение серийных асинхронных двигателей мощностью 50 кВт**

При выборе двигателя для компрессорной установки целесообразно провести сравнительный анализ широко применяемых на рынке технических решений. Рассмотрены три модели мощностью 50–55 кВт: отечественные 1АИМ200М2, АИР200М2 и зарубежный Siemens 1LG4 200-2AB.

1.Двигатель 1АИМ200М2 (Россия)

Класс энергоэффективности IE2, КПД = 93,5 %. Пусковой момент 2,2·M_ном, максимальный момент 2,8·M_ном. Степень защиты IP55. Преимущество: доступная цена и распространённость запасных частей. Недостаток: более низкая энергоэффективность по сравнению с современными аналогами.

2.Двигатель АИР200М2 (Россия)

Класс IE1 (устаревший), КПД = 92,8 %. Пусковой момент 2,0·M_ном, максимальный момент 2,5·M_ном. Степень защиты IP54. Не подходит для требований по энергоэффективности, обязательных на многих объектах с 2017 года.

3.Двигатель Siemens 1LG4 200-2AB (Германия)

Класс IE3, КПД = 95,1 %, cos φ = 0,91. Пусковой момент 2,4·M_ном, максимальный момент 3,0·M_ном. Пусковой ток 6,8·I_ном (ниже, чем у конкурентов). Степень защиты IP55, класс изоляции F. Преимущества: высокая энергоэффективность, отличные пусковые характеристики, наличие полной технической документации. Недостаток: более высокая стоимость

На основе сравнительного анализа в качестве прототипа для дальнейшего исследования выбран двигатель Siemens 1LG4 200-2AB. Он в полной мере удовлетворяет требованиям компрессорной установки: высокий пусковой момент (2,4·M_ном) гарантирует надёжный пуск под нагрузкой, КПД 95,1 % обеспечивает минимальные потери электроэнергии в продолжительном режиме работы S1, а класс изоляции F допускает работу с частотными преобразователями, что позволяет дополнительно экономить до 30 % энергии за счёт регулирования производительности компрессора по принципу «потребления по требованию».

Таким образом, проведённые сравнения показывают, что асинхронные двигатели класса IE3, такие как Siemens 1LG4 200-2AB, являются наиболее практичными и энергоэффективными для обеспечения привода компрессорной установки мощностью 50 кВт. Они обладают достаточным запасом пускового

момента, высокой надёжностью и низкими эксплуатационными затратами, что обеспечивает уверенность в стабильной работе компрессора независимо от режима его эксплуатации.

**Библиографический список**

1. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов / И. П. Копылов. – М.: Юрайт, 2021. – 470 с.
2. Петухов, А. В. Асинхронные двигатели для приводов компрессорных установок / А. В. Петухов // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2(51). – С. 34–41.

© Шакиров А.М., 2026

УДК 621.317.7

А.Н. ШАРАФУТДИНОВА
*alina.sharafutdinova.04@bk.ru*
Науч. руководов. – старший преподаватель Т.Ю. ВОЛКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА

*Аннотация.* В статье проводится сравнительный анализ пунктов коммерческого учета (ПКУ) и высокоточных приборов учета (ВПУ) электрической энергии. Рассматриваются ключевые типы учетного оборудования, их технические характеристики, принципы действия и области применения.

*Ключевые слова:* коммерческий учет электроэнергии, приборы учета, высоковольтный прибор учета, пункт коммерческого учета.

Высоковольтные приборы учета электрической энергии представляют собой устройства, предназначенные для измерения и регистрации объемов потребляемой электроэнергии в условиях высокого напряжения. Они играют важную роль в обеспечении точности расчетов за электроэнергию, управлении нагрузками и мониторинге состояния электросетей.

Потери электроэнергии в электрических сетях — это неизбежная технологическая составляющая, однако ее точное определение и справедливое распределение между участниками рыночных отношений является сложной задачей. Ключевую роль в этом процессе играет расположение и точность точек коммерческого учета.

Пункт коммерческого учета электроэнергии [1, 2] предназначен для учета активной и реактивной энергии прямого и обратного направления в цепях

переменного тока, а также для использования в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), для передачи измеренных и вычисленных параметров на диспетчерский пункт по контролю, учету и распределению электрической энергии.

ПКУ электроэнергии включает в себя несколько ключевых компонентов, обеспечивающих его работоспособность. Основным элементом является счетчик электроэнергии, который должен быть поверен и внесен в государственный реестр средств измерений.

Помимо счетчика, в состав ПКУ могут входить трансформаторы тока и напряжения, которые обеспечивают корректное измерение параметров сети в высоковольтных цепях.

Монтаж осуществляется на опоре ВЛ (Рис. 16). Установка пункта коммерческого учета электроэнергии требует тщательной подготовки. На первом этапе проводится обследование объекта, определяются точки учета и выбирается схема подключения. В зависимости от типа объекта (промышленное предприятие, многоквартирный дом, коммерческое здание) могут применяться различные конфигурации ПКУ.

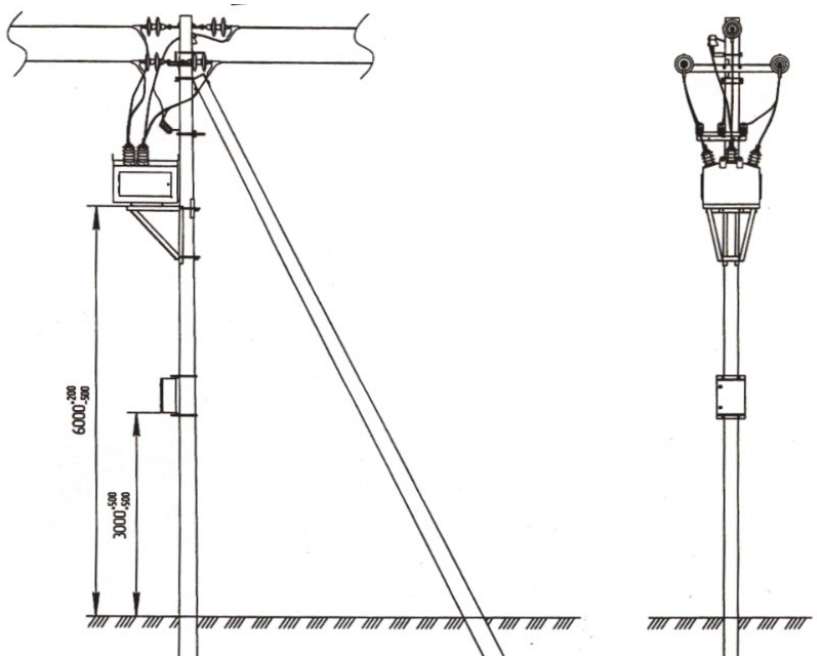


*Рис. 16.* Пункт коммерческого учета электроэнергии. Установка на опоре

При монтаже важно обеспечить правильное подключение трансформаторов тока и напряжения, а также надежную коммутацию цепей учета. Все соединения должны быть выполнены в соответствии с проектной документацией и нормативными требованиями. После установки оборудования проводится его программирование и тестирование, включая проверку точности измерений.

Эксплуатация ПКУ предполагает регулярную поверку приборов учета (как правило, раз в несколько лет), а также периодический контроль показаний. В случае использования автоматизированных систем данные передаются в

центр сбора информации, что позволяет оперативно выявлять отклонения и предотвращать коммерческие потери.

Высоковольтные приборы учета электрической энергии [3] трёхфазные многофункциональные предназначены для измерения активной и реактивной электрической энергии прямого и обратного направления по дифференцированным во времени тарифам в трехфазных трехпроводных сетях переменного тока. ВПУ являются приборами учёта непосредственного включения и заменяют собой пункты коммерческого учёта (ПКУ).

Устройство имеет возможность организации многотарифного учёта электроэнергии с передачей накопленной информации через радиоинтерфейс.

ВПУ предназначены для установки на воздушных линиях (Рис. 17), выполненных проводами марок АС (алюминиево-стальной провод без изоляции) или СИП (самонесущий изолированный провод) около промежуточных или концевых опор.

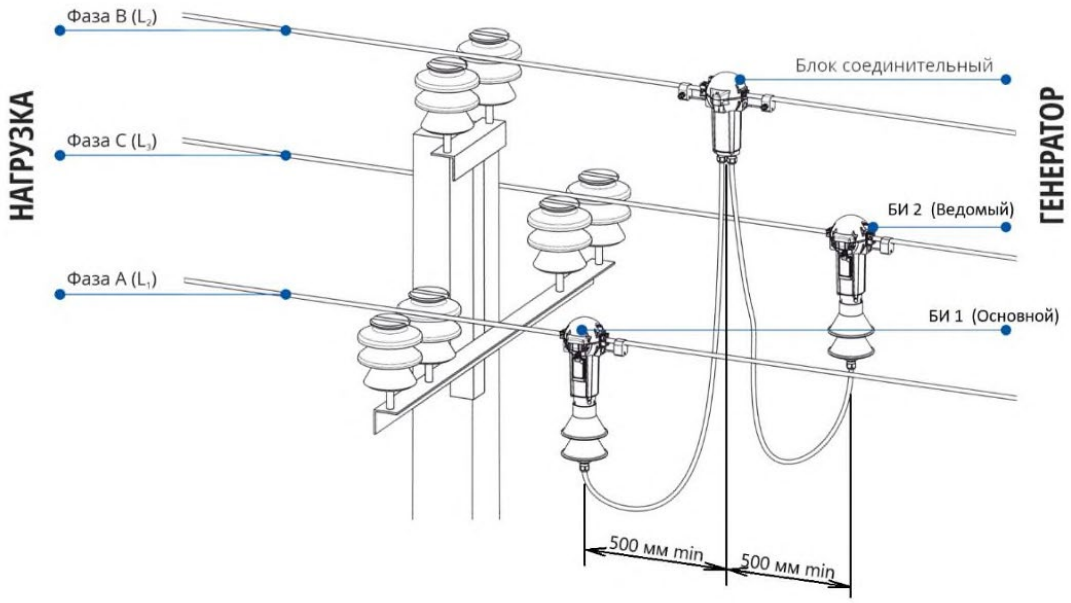



*Рис. 17.* ВПУ, установленный на ВЛ

Конструктивно ВПУ состоят из трёх блоков, два из которых – измерительные (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**3), один соединительный (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**4). Блоки измерительные (далее БИ) подключаются по схеме Арона [4]. Для измерения тока применены электронные датчики тока на основе катушки Роговского [5], взамен трансформаторов тока с металлическим сердечником, применяемых в ПКУ.

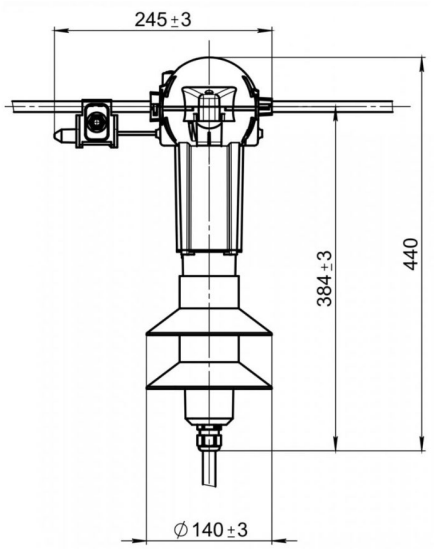



*Рис. 18.* Блок измерительный

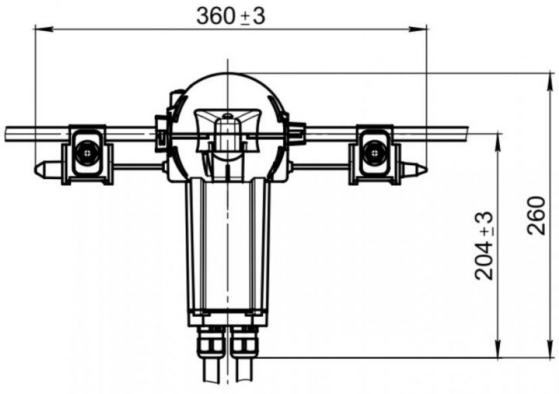



*Рис. 19.* Блок соединительный

Сравнивая ПКУ и ВПУ, можно сделать однозначный вывод о технологическом и экономическом превосходстве высокоточных приборов учета. Если ПКУ выполняет базовую задачу по фиксации объема потребленной энергии, то ВПУ представляет собой комплексное решение для интеллектуального учета.

Функционально ВПУ превосходит ПКУ по всем параметрам: он обеспечивает многотарифный учет, регистрирует профили нагрузки, контролирует качество электроэнергии и параметры сети, поддерживает дистанционную передачу данных. Это позволяет не только точно считать энергию, но и анализировать режимы работы оборудования, выявлять потери и оптимизировать энергопотребление.

В заключении, можно сказать, что традиционные методы постепенно уступают место современным информационным моделям. Для любого потребителя или сетевой компании, работающей на высоком напряжении, переход на высокоточные приборы учета является не просто рекомендацией, а стратегической необходимостью для обеспечения финансовой прозрачности, энергоэффективности и соответствия современным стандартам.

## Библиографический список

1. Пункт коммерческого учета. // URL Пункт коммерческого учета электроэнергии (ПКУ).

2. Пункт коммерческого учета электроэнергии типа ПКУ-10(6). // URL: tmt-pku10-ti.pdf.

3. Высоковольтный прибор учета. // URL: МИРТЕК-135-РУ-инновационный высоковольтный прибор учета. Замена ПКУ от российского производителя «МИРТЕК».

4. Схема Арона. // URL: Трехфазные цепи: схемы соединений, расчет, мощность.

5. Катушка Роговского. // URL: Катушка Роговски - Википедия.

© Шарафутдинова А.Н., 2026

УДК 621.313

И.С. ШЕВЦОВ
*ilya7112@mail.ru*
Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Н.К. ПОТАПЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

# ОБЗОР МЕТОДОВ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ЛЭП

*Аннотация*. Проведен анализ существующих методов термической плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи; сделан вывод о том, что выбор конкретной технологии определяется сложным комплексом технико-экономических факторов: протяженностью линии, ее конфигурацией, требуемой скоростью удаления льда и доступными ресурсами источника питания.

*Ключевые слова*: плавка гололеда, линия электропередач

Для европейской части Российской Федерации, характеризующейся высокой плотностью населения, развитой промышленной инфраструктурой и густой сетью электроснабжения, гололедно-изморозевые отложения на проводах воздушных линий электропередачи (ЛЭП) представляют собой одну из ключевых угроз энергетической безопасности. Частые переходы температуры воздуха через нулевую отметку в осенне-зимний период в сочетании с повышенной влажностью воздушных масс, приходящих с Атлантики, создают в Центральном, Северо-Западном и Приволжском федеральных округах идеальные условия для интенсивного обледенения. Последствия этого явления – от обрывов проводов и поломки опор до масштабных и длительных отключений потребителей – наносят колоссальный социально-экономический ущерб. В подобных условиях пассивные способы защиты, основанные исключительно на усилении механической прочности конструкций, оказываются недостаточными. Возникает критическая необходимость в разработке и внедрении надежных, управляемых и энергоэффективных методов активной плавки льда. Целью данной работы является детальный обзор и сравнительный анализ существующих электротермических методов борьбы с гололедом, основанных на различных родах и частотах тока, оценка их технической эффективности и применимости в современных энергосистемах.

Гололедом принято называть сплошной твердый осадок в виде прозрачного или матового льда с расчетной плотностью до 0,92 г/см³, образующийся при намерзании переохлажденных капель дождя, мороси или

тумана на проводах, имеющих отрицательную температуру. В отличие от рыхлой изморози, состоящей из мелких кристаллов, гололед обладает высокой адгезией к металлу и значительной механической прочностью. Опасность гололеда носит комплексный характер: статические нагрузки увеличиваются за счет многократно возрастающего веса проводов; к ним добавляются динамические нагрузки, вызывающие низкочастотные колебания большой амплитуды («пляску»), что приводит к коротким замыканиям, разрушению изоляторов и усталостному износу материала. В связи с этим энергокомпании вынуждены применять активные способы удаления ледяной муфты.

Все известные методы борьбы делятся на пассивные (применение проводов повышенной прочности или с гладкой поверхностью, например, АССС или Aero-Z) и активные. Активные методы, в свою очередь, подразделяются на механические, электромеханические и термические. Практическое значение для крупных энергосистем сохраняют именно термические способы, основанные на резистивном (джоулевом) нагреве токоведущих жил. Физической основой процесса плавки является закон Джоуля-Ленца, согласно которому выделяемая в проводнике тепловая энергия пропорциональна квадрату тока, активному сопротивлению и времени воздействия. Ключевой задачей при этом становится поддержание теплового баланса, при котором генерируемое тепло превышает потери в окружающую среду и обеспечивает фазовый переход «лед-вода» на границе раздела сред.

**Термическое воздействие переменным током промышленной частоты**

Данный метод является традиционным для отечественной электроэнергетики. Плавка организуется путем подачи на провода напряжения от шин 6-10 кВ подстанции или от специально выделенного трансформатора. Для проводов типа АС, наиболее распространенных на линиях 35-110 кВ, ток плавки должен превышать длительно допустимый в 1,5-2 раза, что мотивировано кратковременностью процесса и улучшенными условиями охлаждения зимой. Например, для сталеалюминиевых проводов сечением 50-185 мм² ориентировочный уровень одночасового тока составляет 270-600 А.

Технологический процесс, однако, сопряжен с серьезными трудностями. Главный недостаток проистекает из особенностей цепей переменного тока: полное сопротивление линии содержит значительную индуктивную составляющую. Поскольку индуктивное сопротивление воздушных линий соизмеримо с активным, а для протяженных участков — и превосходит его, значительная часть полной мощности источника тратится впустую на реактивную составляющую, не производящую полезной работы по нагреву металла. Это требует применения источников избыточной установленной мощности (десятки МВ·А) и предъявляет повышенные требования к питающей сети. Без принятия специальных мер, таких как продольная емкостная компенсация индуктивности, данный метод характеризуется низкой энергоэффективностью. Кроме того, ошибки в выборе схемы или

продолжительности воздействия чреваты опасным перегревом (отжигом) проводов, ведущим к необратимой потере их механической прочности.

Для устранения указанных недостатков предлагались схемы с тиристорными регуляторами переменного напряжения, способные осуществлять фазовое или широтно-импульсное регулирование. В режиме плавки такие устройства формируют управляемый ток за счет изменения углов включения силовых ключей, а в остальное время года могут выполнять функции статического компенсатора реактивной мощности. Однако сложность схемы и высокая стоимость полупроводниковых элементов ограничивают массовое распространение таких модификаций для плавки на частоте 50 Гц.

**Термическое воздействие постоянным током**

Переход на выпрямленный ток позволяет полностью исключить негативное влияние индуктивного сопротивления линии, поскольку для постоянного тока данный параметр равен нулю. В этом заключается главное преимущество метода: падение напряжения и требуемая мощность источника определяются исключительно омическим сопротивлением петли плавки. Коэффициент полезного действия резко возрастает, так как практически вся потребляемая энергия преобразуется в тепло на проводах. Первые промышленные установки такого типа – преобразователи ВУКН-16800-14000 с выпрямленным напряжением 14 кВ и током 1200 А – были созданы еще в середине прошлого века на базе неуправляемых кремниевых вентилей.

Современные устройства строятся по схеме трехфазного мостового выпрямителя, часто с применением полностью управляемых тиристоров, позволяющих плавно изменять ток. Типовое оборудование размещается в стандартном контейнере, что обеспечивает его быстрое развертывание. Основные недостатки метода носят эксплуатационный характер: во-первых, воздушная линия на время плавки должна быть отключена от сети; во-вторых, выпрямительная установка дорога и простаивает большую часть календарного года, так как потребность в плавке возникает лишь в отдельные периоды зимы. Кроме того, классические схемы плавки «провод-провод» ограничивают гибкость применения, а попытки задействовать схему «провод-земля» наталкиваются на ограничения по длительному пропуску постоянного тока через заземляющие устройства подстанций.

**Термическое воздействие током ультранизкой частоты**

Данный метод, ставший возможным благодаря прогрессу в области силовой электроники, представляет собой компромисс, объединяющий технологичность трехфазных систем переменного тока с высокой энергоэффективностью постоянного тока. Суть подхода заключается в формировании на выходе автономного инвертора тока с частотой в десятые доли герца и ниже. При таких частотах индуктивное сопротивление линии становится пренебрежимо малым, и полное сопротивление контура практически выравнивается с активным. Следствием этого является значительное, порой в полтора-два раза, снижение требуемой полной мощности

источника по сравнению с методом промышленной частоты, а также полное отсутствие бесполезных реактивных перетоков.

Техническая реализация предполагает использование комбинированного преобразовательного комплекса. В режиме плавки один мостовой преобразователь функционирует как управляемый выпрямитель, а второй – как трехфазный инвертор напряжения ультранизкой частоты. Это позволяет подавать симметричное трехфазное напряжение на все провода линии одновременно, многократно сокращая общую продолжительность процедуры и минимизируя риск несимметричного нагрева. Ключевым достоинством данного подхода является также возможность круглогодичного использования дорогостоящей вентильной части. В остальное время года установка переводится в режим статического компенсатора реактивной мощности (СТАТКОМ), обеспечивая регулирование напряжения в узле сети и повышая пропускную способность линии. Таким образом, несмотря на высокую начальную стоимость преобразовательной техники и сложность системы управления, метод ультранизкой частоты оказывается наиболее экономически целесообразным в долгосрочной перспективе для ответственных и протяженных линий.

Проведенный анализ существующих методов термической плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи позволяет сделать вывод о том, что выбор конкретной технологии определяется сложным комплексом технико-экономических факторов: протяженностью линии, ее конфигурацией, требуемой скоростью удаления льда и доступными ресурсами источника питания.

Традиционный метод плавки переменным током промышленной частоты, оставаясь наиболее простым с организационной точки зрения, демонстрирует неудовлетворительную энергоэффективность на линиях значительной длины из-за доминирующего влияния индуктивного сопротивления. Применение постоянного тока в корне решает проблему реактивной мощности, превращая электрическую подстанцию на время плавки в источник регулируемого постоянного напряжения, однако вынужденный простой дорогостоящих преобразователей в большую часть года снижает инвестиционную привлекательность данного направления.

Наиболее перспективным подходом, отвечающим современным требованиям к надежности и экономичности, следует признать метод плавки током ультранизкой частоты. Будучи продуктом развития силовой полупроводниковой техники, он объединяет высокий коэффициент полезного действия, характерный для цепей постоянного тока, с удобством реализации трехфазных схем. Снижение требований к полной мощности источника в 1,5-2 раза по сравнению с методом 50 Гц вкупе с возможностью одновременной обработки всех трех фаз делает его безальтернативным решением для тупиковых и транзитных линий с высокой ответственностью. Ключевым экономическим доводом в пользу внедрения комбинированных установок ультранизкой частоты является их двойное назначение: выполняя функцию

плавки гололеда в аварийных режимах, в остальное время года они функционируют как устройства продольной компенсации и регулирования напряжения. Дальнейшая оптимизация алгоритмов управления такими комплексами и снижение стоимости силовых ключей будут способствовать их повсеместному распространению в сетях, эксплуатируемых в сложных климатических условиях.

## Библиографический список


1. РД 34.20.511 (МУ 34-70-028–82). Методические указания по плавке гололеда переменным током. Ч. 1. – М.: Союзтехэнерго, 1983.
2. РД 34.20.511 (МУ 34-70-028–82). Методические указания по плавке гололеда постоянным током. Ч. 2. – М.: Союзтехэнерго, 1983.
3. Алексеев Б.А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок // ЭЛЕКТРО. – 2009. – № 3. – С. 45–50.
4. Патент РФ № 2505903 МКИ H02J3/18, H02G7/16. Комбинированная установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололеда / Сташинов Ю.П., Конопелько В.В. – Опубл. 2014.
5. Патент РФ № 2505897 МКИ H02G7/16. Способ управляемой плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи переменным током / Сташинов Ю.П., Конопелько В.В. – Опубл. 2012.
6. Патент РФ № 2390895 МКИ H02G7/16, H02J3/18. Преобразовательное устройство контейнерного типа для комбинированной установки плавки гололеда и компенсации реактивной мощности / Гуревич М.К., Козлова М.А., Лобанов А.В. и др. – Опубл. 2010.
7. Патент РФ № 2356148 МКИ H02G7/16. Способ и устройство для борьбы с гололедом на линиях электропередачи / Каганов В.И. – Опубл. 2009.
8. Плавка гололеда на проводах линий электропередачи напряжением 6-10 кВ [Электронный ресурс] // Школа для электрика. – Режим доступа: https://electricalschool.info/main/vl/1476-plavka-gololeda-na-provodakh-linijj.html (дата обращения: 01.05.2026)


© Шевцов И.С., 2026

УДК 62.13.133

А.С. СИДОРОВ
*sanyasidorov2004@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент А.В. ЛОБАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА

*Аннотация*. Рассмотрено исследование перспективных направлений развития конструкций асинхронных двигателей, ориентированных на применение с частотными преобразователями.

*Ключевые слова*: асинхронный двигатель; частотно-регулируемый привод; преобразователь частоты; энергоэффективность; медная клетка ротора; изоляция обмоток; независимое охлаждение; математическое моделирование; MATLAB/Simulink; предиктивная диагностика.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором остаются наиболее распространёнными электродвигателями в промышленности благодаря простоте конструкции, высокой надёжности, невысокой стоимости и неприхотливости в эксплуатации. Однако традиционные конструкции асинхронных машин, оптимизированные для работы от сети постоянной частоты, не в полной мере соответствуют требованиям современных частотно-регулируемых приводов.

Переход к управлению через полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ) предъявляет новые, зачастую более жёсткие требования к конструкции двигателя. Это связано с особенностями формы питающего напряжения (ШИМ-сигнал с высокочастотными составляющими), расширенным диапазоном регулирования скорости, необходимостью работы в режимах перегрузки и рекуперации. В связи с этим возникает задача развития и адаптации конструкций асинхронных двигателей для эффективной работы в составе частотно-регулируемого привода.

На основе анализа промышленных решений и литературных данных можно сформулировать следующие основные требования к специальным асинхронным двигателям для частотно-регулируемого привода (таблица 1).

Мировое регулирование в области энергоэффективности – ключевой драйвер развития [1]. Классы энергоэффективности IE (International Efficiency) становятся обязательными во многих странах:

- IE3 (Premium) – минимальный стандарт для многих новых установок.

– IE4 (Super Premium) – активно внедряется, требует применения более качественных материалов (медь, листовая сталь с низкими потерями).

– IE5 (Ultra Premium) – достигается только при использовании постоянных магнитов или синхронных реактивных машин, однако ведётся работа и по асинхронным двигателям с медным литым ротором.

*Таблица 1*

Требования к конструкции асинхронных двигателей для ПЧ

| Параметр | Требование | Обоснование |
|---|---|---|
| Класс изоляции | Не ниже F (155°C), часто H (180°C) | Повышенные тепловые нагрузки от гармоник |
| Устойчивость изоляции к импульсным перенапряжениям | Скорость нарастания фронта ≥ 10000 В/мкс | Защита от пробоя при ШИМ |
| Охлаждение | Независимый вентилятор (IC416) | Обеспечение охлаждения на низких оборотах |
| Динамическая балансировка ротора | Класс точности G2,5 или выше | Работа на повышенных частотах |
| Конструкция подшипников | Усиленные, с защитой от токов высокой частоты | Защита от «электрокоррозии» из-за токов на валу |
| Материал магнитопровода | Электротехническая сталь с низкими удельными потерями (например, 2412) | Снижение потерь от ВЧ-гармоник |

Асинхронные двигатели с литой медью в роторе (вместо алюминия) позволяют существенно снизить потери в роторе и достичь уровня IE4, сохраняя при этом технологичность.

Встраивание датчиков температуры (PT100, KTY) непосредственно в обмотку статора и подшипниковые узлы позволяет реализовать прогнозирующее обслуживание [2]. По данным датчиков и на основе математической модели двигателя система управления ПЧ может оценивать остаточный ресурс и предотвращать аварии [3]. Исследования показывают, что создание точной модели асинхронного двигателя в среде MATLAB/Simulink является важнейшим этапом проектирования современных систем ПЧ-АД для оптимизации режимов.

Современные алгоритмы управления — векторное, прямое управление моментом (DTC) и модальное — позволяют добиться высокого быстродействия, сопоставимого с приводом постоянного тока [4]. Это накладывает требования на параметры двигателя. Например, для эффективной работы DTC необходимо определённое соотношение индуктивностей. Конструкторы начинают оптимизировать форму паза статора и конфигурацию короткозамкнутой клетки ротора не только для работы от 50 Гц, но и для обеспечения минимальной пульсации момента при питании от ПЧ [5].

Большинство современных исследований направлено на разработку точных математических моделей в среде MATLAB/Simulink. Рассмотрим изменение тока АД под действием управляющего сигнала системы

регулирования с использованием нечеткой логики будет определяться выражением

$$I_{\text{АД2}} = \frac{z_q \cdot z \cdot z_{qB} \cdot z_B \cdot I_{IR}}{(x_d \cdot x_q + r^2)(x_{dB} \cdot x_{qB} + r_B^2)} \times \left[ 1 - \frac{T'^2_{B\Gamma} \cdot e^{-t/T'_{B\Gamma}}}{(T'_{B\Gamma} - T'_{BB})} - \frac{T'^2_{BB} \cdot e^{-t/T'_{BB}}}{(T'_{BB} - T'_{B\Gamma})} \right]$$

где $I_{IR}$ -управляющий сигнал интеллектуального регулятора.

По разработанной математической модели с использованием математической среды Matlab 6.5 была разработана имитационная модель динамических режимов работы АД при внезапных подключениях различного вида нагрузок к основной обмотке АД (рисунок 1).

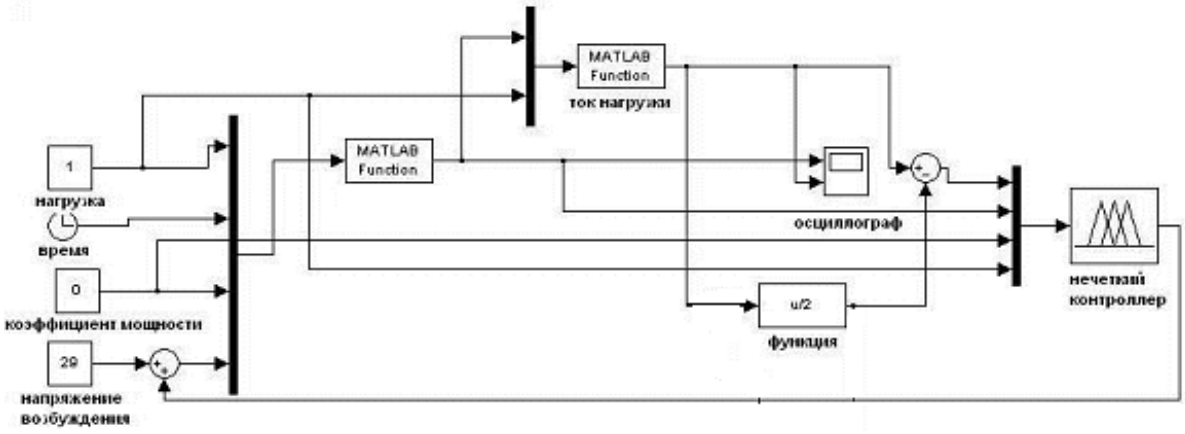



*Рис. 1.* Имитационная модель динамических режимов работы АД

Результаты моделирования приведены на графике по рисунку 2. На рисунке 2 приведена зависимость получившегося тока АД от времени.

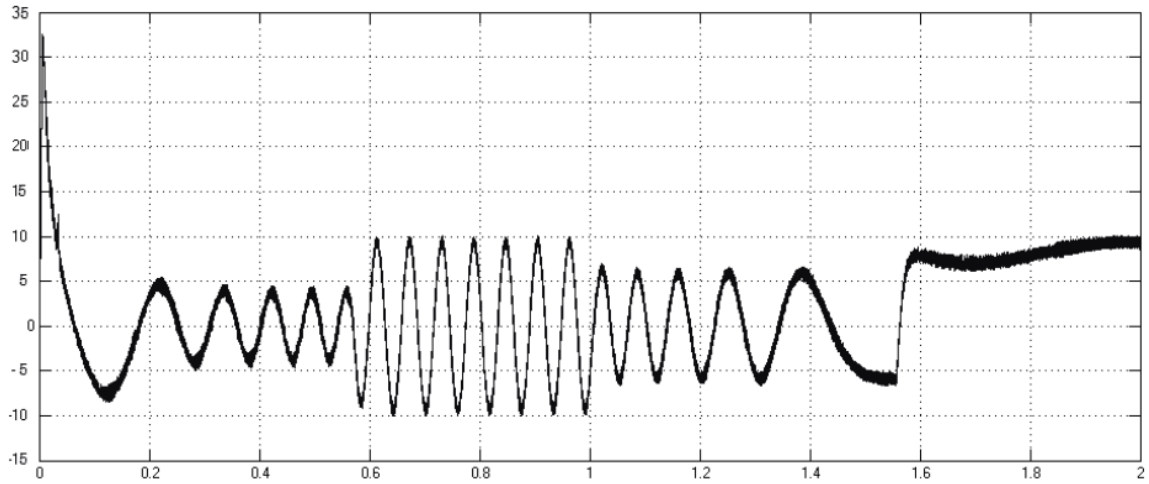



*Рис. 2.* График зависимости тока от времени

Данные значения имеют следующие характеристики. В момент запуска двигателя пусковой ток достигает значения 30 А. Пусковой ток – это ток, который потребляет электродвигатель во время пуска. Затем значения тока принимают номинальное заданное значение - 10 А. Соответственно кратность пускового тока к номинальному равна 3,25. Такое состояние пускового тока благоприятно отразится на работе электрооборудования и сократит затраты на потребление электроэнергии.

По произведенному моделированию четко наблюдается преимущество использования асинхронного двигателя. Пусковой ток находится в границах нормы. Всё это благоприятно скажется на электропотреблении АД и приведет к его снижению.

Выводы:

1. Асинхронный двигатель остаётся доминирующим типом для частотно-регулируемого привода в диапазоне мощностей от 0,75 до 500 кВт благодаря оптимальному соотношению цены, надёжности и технологичности.
2. Основные направления модернизации конструкций: усиление изоляции обмоток, переход на независимое охлаждение, применение высококачественных магнитных материалов, повышение класса точности балансировки ротора.
3. Энергоэффективность является ключевым драйвером: переход на медную клетку ротора позволяет достичь уровня IE4 без радикального усложнения технологии производства.
4. «Интеллектуализация» двигателя (встраивание датчиков температуры, вибрации) становится стандартом для предиктивной аналитики и реализации концепции «Цифровой двойник».
5. Математические модели в среде MATLAB/Simulink позволяют проводить расчеты двигателей и прогнозировать их состояние.

**Библиографический список**

1. Invertek Drives Unveils New Variable Frequency Drive for Hybrid and High-Efficiency Motor Control // eJARN.com. – 2025. – 25 November.
2. Сибирский федеральный университет. Исследование динамических свойств частотно-регулируемого асинхронного электропривода с модальным управлением. – 2017-2020.
3. New Variable Frequency Drive for Hybrid and High-Efficiency Motor Control // Control Engineering Europe. – 2025. – 5 December.
4. Преобразователь частоты: устройство, схемы, управление и настройка // eti.su. – 2025. – 6 декабря.
5. Мещеряков В.Н., Мещеряков В.Н., Башлыков А.М., Вейнмейстер А.В. Реализация успешного запуска и стабильной работы синхронизированного электропривода с применением адаптивных регуляторов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6.

© Сидоров А.С., 2026

УДК 621.313.323-762

О.Б. СИРАЗИТДИНОВ
*sirazitdinovoskar@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент И.И. ЯМАЛОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ГЕРМЕТИЧНЫЙ СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДИСКОВОГО ТИПА ДЛЯ ЯДЕРНО-ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Аннотация*. Рассмотрены вопросы герметизации электрических машин, применяемых на ядерно-химических производствах. Показано, что традиционные асинхронные двигатели обладают недостаточным ресурсом и низкой надежностью в условиях агрессивной среды. Предложена конструкция герметичной синхронной машины дискового типа. Описаны особенности ее устройства и принцип работы.

*Ключевые слова*: герметичный синхронный двигатель, постоянные магниты, дисковые электродвигатели, ядерно-химическое производство, герметичная синхронная машина.

Герметичные электрические машины предназначены для работы на ядерно-химических производствах для обеспечения безопасности, защиты обслуживающего персонала и окружающей среды от вредного воздействия, в том числе в условиях аварийных режимов работы технологического оборудования. На большинстве предприятий отрасли встает вопрос о модернизации технологического оборудования в связи с его износом, а также с непрерывным расширением и увеличением мощности производства [1]. Модернизация должна охватывать не только замену основного оборудования, но и решать проблему герметизации вспомогательного электрооборудования, использующего электроприводы с герметичными двигателями. Актуальность задачи обусловлена высокой химической активностью перерабатываемых веществ, представляющих опасность для оборудования и среды.

Степень герметизации электрооборудования регламентируется системой государственных стандартов. Согласно ГОСТ 18311-80 «Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий, 1982», герметичным считается электротехническое изделие, конструкция которого практически исключает сообщение между его внутренним пространством и окружающей средой. Для классификации уровня защиты оболочек от проникновения твёрдых частиц и жидкостей применяется ГОСТ 14254-2015 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP), 2017», устанавливающий код IP (Ingress Protection). Первая цифра кода (от 0 до 6) характеризует защиту от пыли, вторая (от 0 до 9) - от воды. В ядерно-химическом производстве, где возможны утечки агрессивных сред, требуются

степени защиты не ниже IP67 (пыленепроницаемость и защита при временном погружении) или IP68 (при длительном погружении).

Кроме того, из-за риска образования взрывоопасных смесей (водород, пары химических реагентов) герметичные двигатели должны соответствовать требованиям ГОСТ 31610.0-2019 «Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования, 2020». Этот стандарт классифицирует взрывозащищённое оборудование по уровням (Ga, Gb, Gc для газовых сред, Da, Db, Dc для пылевых) и предписывает конструктивные меры - например, герметичную оболочку, исключающую контакт искрящих частей с внешней атмосферой.

Эксплуатация герметичных асинхронных двигателей показала, что они имеют малый ресурс, вызванный проникновением внутрь технологических жидкостей, которые оказывают разрушающее действие на конструктивные элементы машины [1,3]. Одним из слабых мест в герметизации машины является узел сочленения валов электродвигателя с исполнительным механизмом. Различные типы уплотнений не обеспечивают достаточной надежности. Наиболее распространенным способом герметизации асинхронных двигателей стали защитные гильзы, которые устанавливались между статором и ротором электрической машины, защищая обмотки статора от воздействия среды. Однако такой способ приводит к снижению энергетических показателей [1], что требует разработки нового типа герметичных электрических машин.

Решить данную задачу удалось благодаря успехам в разработке и освоении редкоземельных постоянных магнитов с высокой магнитной энергией и исследованию торцевых (дисковых) электрических машин [3]. В новом типе двигателя герметизация осуществляется сплошным неподвижным экраном [2], который располагается между технологическим оборудованием и двигателем, при этом крутящий момент электродвигателя передается к рабочему органу через герметизирующую перегородку, выполненную из материалов, стойких к агрессивной среде.

Применение электродвигателя дискового типа упрощает конструкцию герметизирующего экрана и повышает надежность электрической машины, так как основная часть двигателя остается вне зоны технологической емкости [1,3]. Внедрение такого двигателя повышает экономическую эффективность за счет снижения затрат на ремонт оборудования и увеличения межремонтных сроков [2].

Для решения задачи была предложена конструкция герметичной синхронной электрической машины дискового типа (рис. 1). Она сочетает преимущества торцевых двигателей с повышенной выходной мощностью. Выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами, который может быть применен в качестве приводного двигателя в тяжелых условиях эксплуатации.

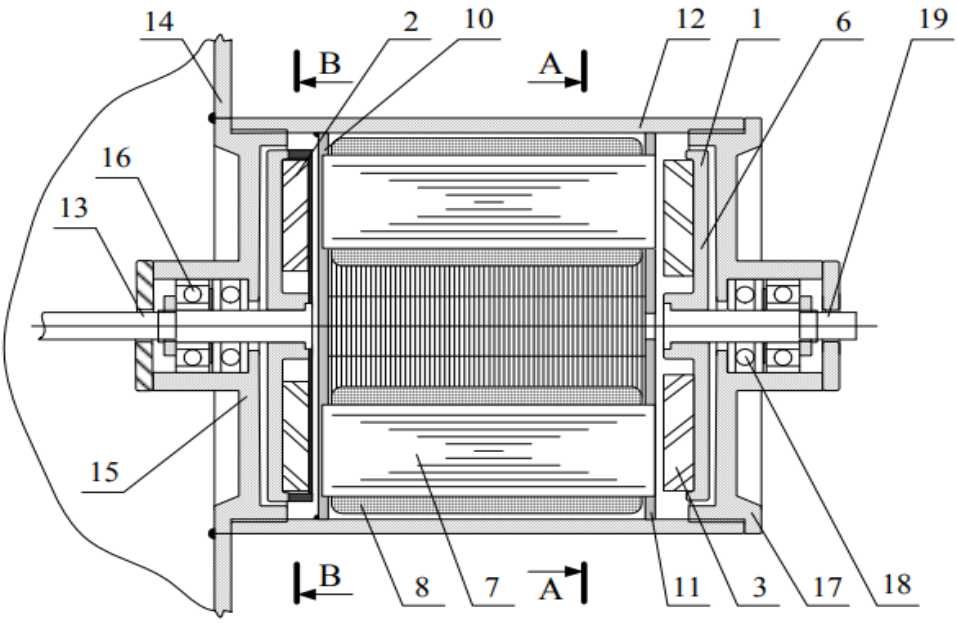



*Рис. 1.* Конструкция герметичной синхронной машины дискового типа:
1 – ротор; 2,3 – диски; 3 – магниты; 6 – ярмо; 7 – статор; 8 – стержни; 10 – герметичная перегородка; 11 – каркас; 12 – корпус; 13 – вал; 14 – часть технологического аппарата; 15,17 – щит; 16,18 – подшипники

Магнитное поле двигателя создается постоянными магнитами, расположенными на роторе электрической машины. Статор машины содержит трехфазную обмотку, выводы которой соединяются с разъемом для электропитания синхронного двигателя. Конструкция двигателя состоит из двух дисков, на которых расположены высококоэрцитивные постоянные магниты (рис. 2). Постоянные магниты устанавливаются и удерживаются на дисках посредством сил магнитного притяжения.

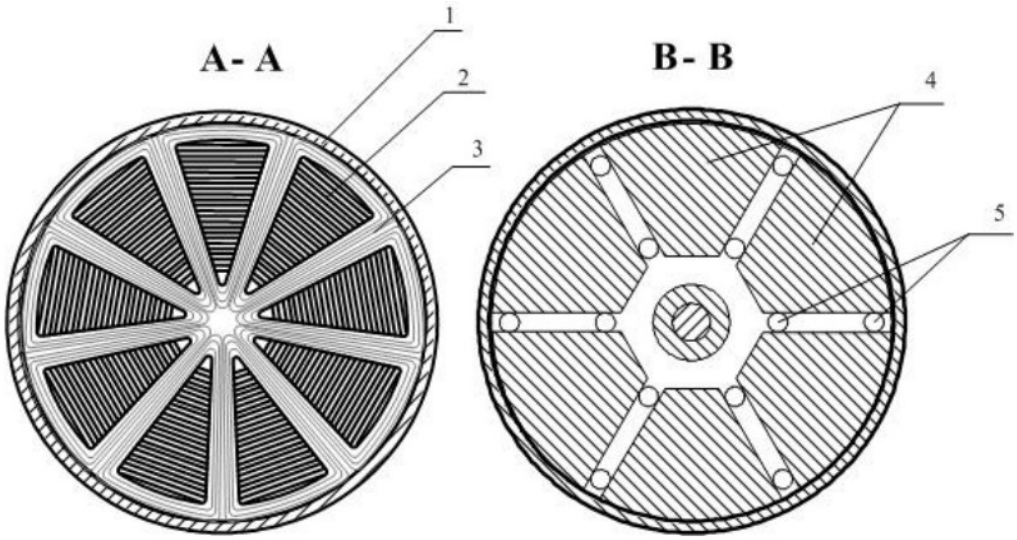



*Рис. 2.* Эскиз сечения статора и ротора:
1 – корпус; 2 – стержень; 3 – обмотка; 4 – постоянные магниты; 5 – упоры

Эскиз сечения статора и ротора приведен на рисунке 2. Упоры предотвращают проскальзывания магнитов относительно ярма. Между дисками ротора находится статор, содержащий n количество стержней с намотанной на них обмоткой. Стержни статора закреплены между герметичной перегородкой и каркасом, которые выполнены из немагнитного материала. Статор размещается внутри прочного корпуса. При этом диск устанавливается на валу внутри технологического аппарата и удерживается щитом с подшипниками. К щиту резьбовым соединением прикрепляется прочный корпус. Диски и роторы взаимно притягиваются за счет магнитных сил и функционируют синхронно. Герметичная перегородка и щит имеют сварное соединение с прочным корпусом и со стенками технологического аппарата. Стержни статора выполняются из листов электротехнической стали.

Разработанная герметичная синхронная машина дискового типа устраняет недостатки асинхронных аналогов, обеспечивая высокую надежность в агрессивной среде. Она повышает безопасность, энергетические показатели и экономическую эффективность за счет снижения затрат на ремонт оборудования и увеличения межремонтных сроков.

## Библиографический список

1. Федянин А. Л. Герметичный синхронный двигатель для химического производства: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.01/ Томск, 2007 [Электронный ресурс] URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003174159/ (дата обращения 26.03.2026).

2. Медведев В. С., Зюкин И. М., и др. Герметичный экранированный электродвигатель: пат. 2476973 Рос. Федерация. № 2011109412/07; заявл. 11.03.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. №6 https://patents.google.com/patent/RU2476973C2/ru (дата обращения 08.04.2026).

3. Леонов С. В. Статическая модель герметичного синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными полюсами / С. В. Леонов, А. Л. Федянин, О. П. Муравлев. [Электронный ресурс] URL: https://earchive.tpu.ru/handle/11683/2180 (дата обращения 06.04.2026).

© Сиразитдинов О.Б., 2026

УДК 621.313.322

А.Р. ТАБИШЕВ
*azamat.tabishev@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент О.А. ЮШКОВА

***Уфимский университет науки и технологий***

# АНАЛИЗ СПОСОБОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

*Аннотация*. В статье выполнен анализ систем возбуждения синхронных генераторов, применяемых в дизель-генераторных установках. Рассмотрены щёточные и бесщёточные системы. Приведены их принципы действия, преимущества и недостатки. Обосновано, что для большинства применений оптимальна шунтовая система как наилучшее технико-экономическое решение.

*Ключевые слова*: установка дизель-генераторная, генератор синхронный, система возбуждения, щеточное возбуждение, бесщеточное возбуждение, шунтовое возбуждение, *SHUNT*, *AREP*, *PMG*, автоматический регулятор напряжения.

Дизель-генераторные установки (ДГУ) являются основой систем гарантированного и автономного электроснабжения промышленных объектов, телекоммуникационных центров, медицинских учреждений и жилых комплексов. Ключевым элементом ДГУ выступает синхронный генератор, стабильность его выходного напряжения и перегрузочная способность напрямую зависят от системы возбуждения (СВ). СВ обеспечивает питание обмотки ротора постоянным током, создавая основной магнитный поток машины и выполняя такие функции, как первичное возбуждение, поддержание холостого хода, регулирование напряжения, синхронизация и форсировка возбуждения [1].

В зависимости от способа передачи тока в обмотку возбуждения ротора различают щёточные (контактные) и бесщёточные (бесконтактные) системы. В последние десятилетия наблюдается переход к бесщёточным системам ввиду их повышенной надёжности и сниженных эксплуатационных расходов [2]. Однако внутри класса бесщёточных систем существует несколько конкурирующих топологий (*SHUNT, AREP, PMG*), выбор которых требует технико-экономического обоснования [3].

Цель данной работы – провести сравнительный анализ указанных способов возбуждения и выявить наиболее подходящий для применения в ДГУ средней и малой мощности.

Щёточная система возбуждения является исторически первой и до сих пор встречается в генераторах старых типов. В этой системе обмотка

возбуждения, расположенная на роторе, получает питание от внешнего источника постоянного тока через контактные кольца и графитовые щётки [4].

Основным достоинством щёточной системы является простота конструкции и низкая стоимость начальной реализации.

К числу основных недостатков щеточных систем относится наличие контактного узла, наиболее подверженного износу в процессе эксплуатации. При работе образуется большое количество пыли от угольных щеток, которая загрязняет обмотки, ухудшает изоляцию и может создавать проводниковые мосты между токоведущими частями и корпусом, что снижает срок службы генератора и требует внеочередных ремонтов. Кроме того, щеточные системы требуют регулярного технического обслуживания и замены изнашивающихся элементов [5].

Бесщёточное возбуждение реализуется путём установки на одном валу с основным синхронным генератором вспомогательной машины – возбудителя. Возбудитель представляет собой синхронный генератор с обращённой конструкцией (обмотка якоря на роторе, обмотка возбуждения на статоре). Выходное напряжение возбудителя выпрямляется вращающимся выпрямительным блоком (диодным мостом) и подаётся непосредственно на обмотку ротора главного генератора. Отсутствие контактных колец и щёток кардинально повышает надёжность и ресурс [6].

Система автоматического регулирования напряжения (АРН) управляет током в обмотке возбуждения возбудителя, тем самым стабилизируя выходное напряжение главного генератора. По способу питания АРН различают три основные бесщеточные топологии.

Бесщеточные системы подразделяются на несколько типов, среди которых особого внимания заслуживает шунтовая система (*SHUNT*). СВ *SHUNT* отличается довольно простой конструкцией и является оптимальным вариантом для базового использования. Как показано на (рис. 1) питание АРН осуществляется от силовых шин генераторного устройства, а регулятор выпрямляет и подаёт ток на обмотку статора возбудителя [7]. Эта система соответствует требованиям ГОСТ IEC 60034-1-2024, в частности устойчивости к 150% перегрузке по току в течение 120 секунд [8].

Система обладает такими преимуществами, как: минимальная стоимость и компактность. Недостатками системы являются: чувствительность к нелинейным нагрузкам и падениям напряжения.

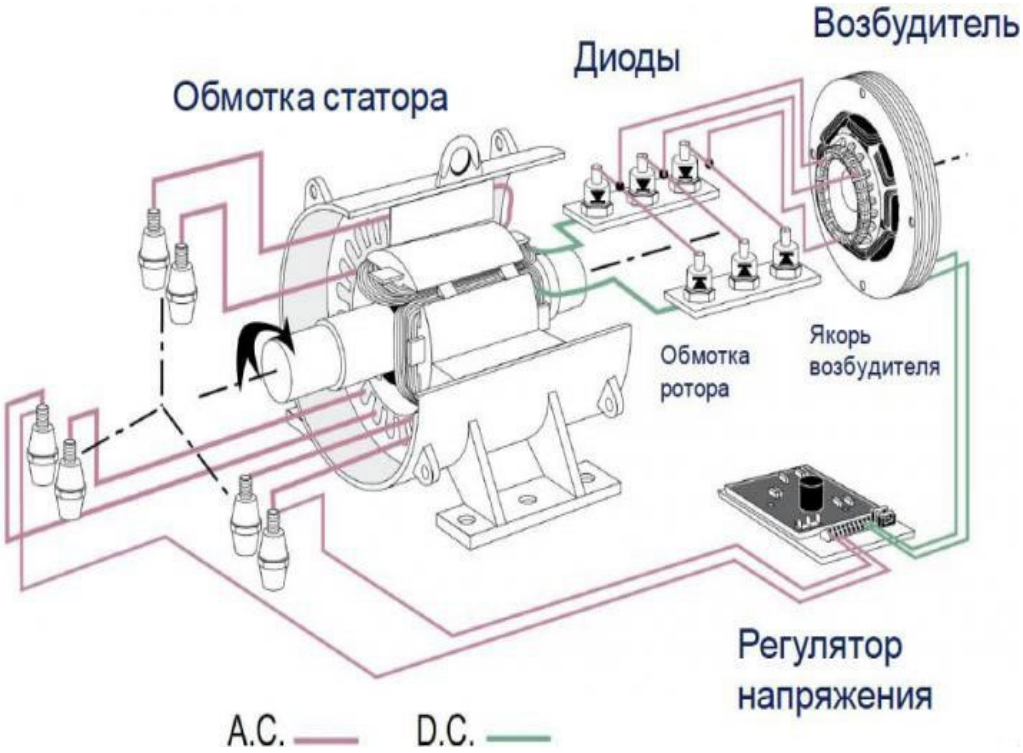



*Рис 1.* Система возбуждения *SHUNT*

Топология *AREP* (от англ. *Auxiliary Regulating Excitation Principle*) использует в статоре главного генератора две дополнительные вспомогательные обмотки (рис.2). Одна из них (напряжение-зависимая) подключена параллельно фазным обмоткам, вторая (ток-зависимая) – последовательно с нагрузкой. Их выходы суммируются и выпрямляются для питания АРН. Благодаря токовой обмотке при коротких замыканиях и пусках двигателей АРН получает дополнительную мощность, что позволяет системе поддерживать напряжение значительно дольше [9].

Система *AREP* в сравнении с *SHUNT* лучше работает при нелинейных нагрузках, но имеет более сложную конструкцию статора, наличие дополнительной обмотки, что ведет к удорожанию генератора.

*PMG (Permanent Magnet Generator*) – это отдельный трёхфазный генератор на постоянных магнитах, установленный на том же валу, что и основной генератор. АРН питается исключительно от *PMG*, полностью независимо от выходного напряжения главного генератора (рис. 3). Это обеспечивает наилучшие динамические характеристики [9].

Система *PMG* имеет такие достоинства, как: полная независимость питания АРН от нагрузки и искажений на главном статоре, минимальное время восстановления напряжения после броска нагрузки. Недостатки: высокая стоимость, увеличенные габариты и масса.

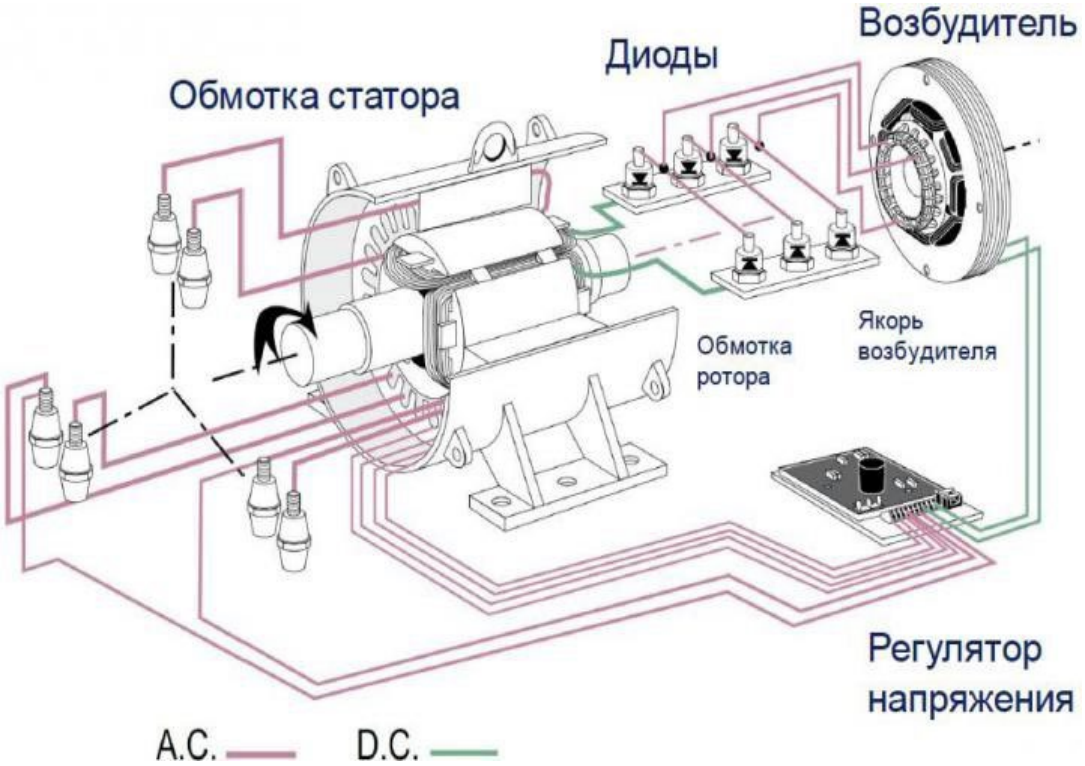



*Рис 2.* Система возбуждения AREP

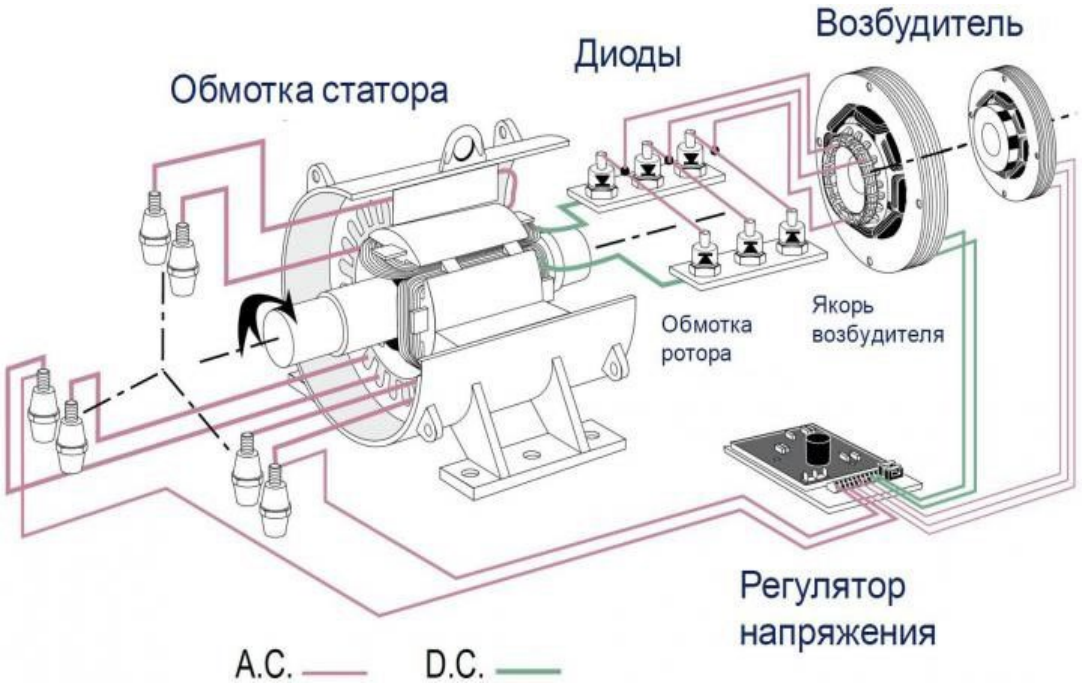



*Рис. 3*. Система возбуждения PMG

Анализ показывает, что щёточная система уступает бесщёточным по всем ключевым показателям, кроме начальной цены. Однако её эксплуатационные расходы и низкая надёжность делают её неприемлемой для современных ДГУ, работающих автоматическом режиме.

Среди бесщёточных систем выбор должен определяться условиями эксплуатации. Для большинства стандартных ДГУ (резервное питание, работа

на линейную активно-индуктивную нагрузку, отсутствие мощных преобразователей частоты) наиболее подходящей является шунтовая система.

В результате сравнения основных характеристик рассмотренных систем можно выявить преимущества бесщеточного шунтового возбуждения для применения в ДГУ:

- повышенная надежность и долговечность – меньшее количество компонентов снижает вероятность отказов;

- приемлемое качество регулирования напряжения – бесщеточное шунтовое возбуждение обеспечивает автоматическое поддержание напряжения в широком диапазоне нагрузок. Система обладает саморегулирующимся электромагнитным действием, обеспечивая отклонение напряжения в пределах ±1% при ступенчатом изменении нагрузки от 0 до 100%. АРН, получающий питание от силовых шин генератора, осуществляет генерацию и регулировку тока возбуждения в соответствии с выходным напряжением;

- шунтовая СВ конструктивно проще, чем системы *PMG* и *AREP*, что упрощает её изготовление, наладку и ремонт. Стоимость генератора с такой системой ниже, а его обслуживание не требует высокой квалификации персонала. Учитывая, что ДГУ часто эксплуатируются в условиях ограниченного сервисного обслуживания простота и ремонтопригодность становятся важными аргументами.

Несмотря на некоторые ограничения, бесщеточное шунтовое возбуждение в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к системам возбуждения синхронных генераторов: начальное возбуждение, работа на холостом ходу, поддержание заданных параметров в энергосистеме, синхронизация и форсировка возбуждения. Важно отметить, что бесщеточные системы широко применяются для синхронных генераторов в автономных системах энергоснабжения.

Системы *AREP* и *PMG* следует применять только при наличии специфических требований: питание нелинейных нагрузок, необходимость высокого тока короткого замыкания (более 200% для селективного отключения автоматов) или работа в условиях частых глубоких просадок напряжения. Однако для типовых ДГУ эти системы ведут к неоправданному удорожанию.

Таким образом, для большинства дизель-генераторных установок средней и малой мощности рекомендуется шунтовая система возбуждения как оптимальное технико-экономическое решение.

## Библиографический список

1. Возбуждение дизельного генератора: принципы, схемы и типы систем управления напряжением [Электронный ресурс] / Бриз Моторс. – 2025. – URL: https://www.brizmotors.ru/useful/article/vozbuzhdenie-dizelnogo-generatora-printsipy-skhemy-i-tipy-sistem-upravleniya-napryazheniem/ (дата обращения: 10.04.2026).

2. Конструкция, назначение и способы возбуждения синхронных машин. Раздел 1.3 «Системы возбуждения синхронных машин» [Электронный ресурс] // СтудИзба. – 2020. – 3 июня. – URL: https://studizba.com/lectures/inzhenerija/sinhronnye-mashiny/39325-konstrukcija-naznachenie-i-sposoby-vozbuzhdenija-sinhronnyh-mashin.html (дата обращения: 10.04.2026).

3. Костин С**.** Системы возбуждения дизельной станции [Электронный ресурс] // pes-generator.ru : сайт компании «ПЭС Генератор». – 2022. – 11 апреля. – Режим доступа: https://pes-generator.ru/news/sistemy-vozbuzhdenija-dizelnoj-stancii (дата обращения: 10.04.2026)

4. Строев В. А., Усынин Ю. А. Системы возбуждения синхронных генераторов : монография. – М. : Издательский дом МЭИ, 2012. – 248 с.

5. Алексеев С. В., Бурковский А. В. Эксплуатация и обслуживание синхронных генераторов в автономных энергосистемах // Электричество. – 2018. – № 4. – С. 45–51.

6. Бесщёточные синхронные генераторы: устройство и особенности эксплуатации [Электронный ресурс] // Дзен. – 2025. – 30 апреля. – Режим доступа: https://dzen.ru/a/aBHoJz48oAugmiSQ (дата обращения: 10.04.2026).

7. Системы возбуждения генераторов переменного тока (альтернаторов). Разновидности. Отличия [Электронный ресурс] // Завод Ресурс. — 2020. — 14 апреля. — Режим доступа: https://zavodresurs.ru/blog/vybor-oborudovaniya/sistemy-vozbuzhdeniya-generatorov-peremennogo-toka-alternatorov-raznovidnosti-otlichiya/ (дата обращения: 10.04.2026).

8. ГОСТ IEC 60034-1-2024 «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики».

9. Системы возбуждения генераторов [Электронный ресурс] // Сафдар-Энерго : сайт компании. – Режим доступа: https://safdar-energo.ru/excitation_system (дата обращения: 10.04.2026).

© Табишев А.Р., 2026

УДК 621.373

А.А. ЗИГАНШИН
*ziganshin4lmaz@yandex.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Р.К. ФАТТАХОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# ГЕНЕРАТОР ВАН ДЕ ГРААФА КАК ПРЕДСТАВИТЕЛЬ КЛАССА ЁМКОСТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: ПРЕИМУЩЕСТВА, НЕДОСТАТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Аннотация*. Представлен анализ электростатического генератора Ван де Граафа, рассматриваемого как классическое устройство класса емкостных электрических машин. Описаны история создания, принцип действия и базовые конструктивные особенности. Выявлены преимущества и недостатки.

*Ключевые слова*: генератор Ван де Граафа, электростатическая машина, емкостной генератор.

Генератор Ван де Граафа является одним из наиболее известных представителей класса электростатических машин — устройств, в которых электрическая энергия создаётся за счёт механического переноса электрических зарядов и их последующего накопления на изолированном проводящем электроде. В 1936 году был построен самый большой в мире электростатический генератор постоянного напряжения [1]. Самый большой двухкаскадный генератор Ван де Граафа состоял из двух огромных колонн диаметром почти по 2 метра каждая и высотой примерно по 15 метров с закреплёнными сверху металлическими сферами диаметром по 4,5 метра и позволял получать разность потенциалов в 7 000 000 вольт (Рис. 1. Конструкция генератора).

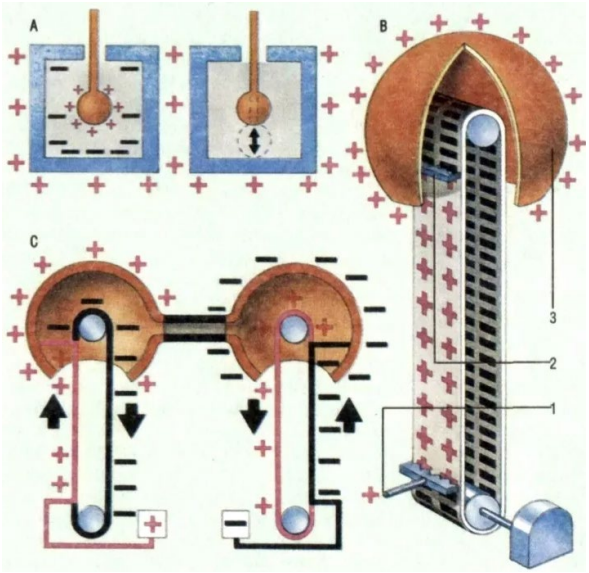



*Рис. 1.* Конструкция генератора

На первом таком генераторе, разработанном американским физиком в 1929 году, удалось достичь разности потенциалов 80 кВ. В последующем построенные более мощные генераторы позволили достичь напряжения в 1 миллион и 7 миллионов вольт. Мощности генератора хватало для реальной исследовательской работы – для ускорения атомных ядер, а также элементарных частиц, таких как протоны и электроны, до достаточно высоких скоростей.

Принцип действия генератора Ван де Граафа заключается в следующем. Шёлковая или резиновая лента натянута и вращается подобно конвейерной ленте на паре роликов, один из которых находится в основании колонны, второй – внутри полости проводящей сферы наверху. Нижний ролик изготовлен из металла и гальванически соединён с землёй, он приводится во вращение двигателем. Верхний ролик – диэлектрический. К ленте снизу, под нижним роликом, с небольшим зазором подведена металлическая щётка, соединённая с положительной клеммой источника высокого напряжения, отрицательная клемма которого присоединена непосредственно к нижнему ролику. Итак, между нижним роликом и щёткой движется диэлектрическая лента. Под действием высокого напряжения между роликом и щёткой воздух между ними ионизируется, и положительные ионы воздуха, влекомые силой Кулона, устремляются к отрицательно заряженному ролику. Но поскольку на пути ионов находится диэлектрическая лента, ионы оседают на ленте, заряжая её таким образом. Лента движется снизу вверх: внизу она непрерывно получает заряд, одновременно с этим заряд с её поверхности непрерывно забирается возле верхнего ролика, так как верхний ролик внутри сферы тоже имеет расположенную рядом с собой щётку. Щётка снимает заряд с ленты и, будучи соединена гальванически с внутренней поверхностью полой проводящей сферы, передаёт ей заряд, всё больше и больше электризуя эту сферическую ёмкость по всей её наружной поверхности [1].

Генератор Ван де Граафа может вырабатывать на своей сферической крышке напряжение более 10 миллионов вольт. В ядерной физике такое высокое напряжение можно использовать для ускорения разного рода заряженных частиц, таких как протоны, электроны и т.д. Предельная разность потенциалов, которую возможно практически получить с помощью генератора Ван де Граафа, составляет примерно $10^7$ В. В современных генераторах, где сферы помещают в барокамеру грушевидной формы, заполненную азотом под давлением от 1,6 до 2,2 МПа, достигаемое напряжение до 12 МВ.

Генератор Ван де Граафа как представитель класса ёмкостных электрических машин обладает следующими ключевыми преимуществами: способность генерации сверхвысокого постоянного напряжения (в отличие от электромагнитных машин, генераторы Ван де Граафа позволяют получать потенциалы в миллионы вольт при сравнительно простой конструкции); относительная простота управления (для изменения выходного напряжения достаточно изменить скорость движения ленты или параметры зарядного

устройства, что не требует сложных систем радиоэлектроники или охлаждения).

Наряду с достоинствами, генератору Ван де Граафа присущи и недостатки: низкий КПД; невысокий выходной ток (это ограничение характерно для всех электростатических машин, по этой причине генератор никогда не использовался для промышленной выработки электроэнергии); значительные габариты (для генерации напряжения порядка 10 миллионов вольт высота ускорительной колонны составляет минимум несколько метров, что требует специальных лабораторных помещений и систем безопасности).

В сравнении с электромагнитными машинами генератор Ван де Граафа проигрывает по мощности, но выигрывает по величине генерируемого напряжения. Электромагнитные генераторы являются основой современной энергетики и способны производить мегаватты мощности при напряжениях в сотни киловольт.

Несмотря на возраст конструкции, эволюция генератора Ван де Граафа продолжается. Основные направления современного развития включают:

1. Пеллетроны. Принцип работы генератора на основе чередующихся металлических и пластиковых звеньев позволяет рассматривать его в качестве конденсатора, ёмкость которого по мере движения увеличивается.
2. Применение в медицине. Ускорители на основе генераторов Ван де Граафа используются для протонной терапии и производства медицинских изотопов.
3. Фундаментальные исследования. В будущем возможно дальнейшее развитие гибридных ускорительных схем, в которых ёмкостной генератор используется как инжектор для более мощных циклических или линейных ускорителей. В последнее десятилетие в сфере микротехнологии субмикронные размеры деталей потребовали применения технологии LIGA (литография, гальваника и формовка), что оказалось возможным только с применением рентгеновской литографии на пучках синхротронного излучения.

Генератор Ван де Граафа, созданный в 1930-х годах, является классическим и наиболее совершенным представителем ёмкостных электрических машин. Устройство позволяет получать сверхвысокое постоянное напряжение при высокой стабильности выходных параметров, что делает его незаменимым для приложений в ядерной физике и медицинской технике. Основным недостатком, связанным с физическим принципом работы, является ограниченная энергия частиц и невысокий КПД. Историческое значение изобретения Ван де Граафа и техническая значимость электростатических ускорителей остаются весьма высокими. Усовершенствованные варианты конструкции, улучшенная изоляция и новые теоретические подходы к пониманию принципов работы продолжают использоваться в мировой науке и практике, а сам генератор остаётся важным инструментом в арсенале современного учёного.

**Библиографический список**

1. Херб Р. Ускорители Ван де Граафа / пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1960. Профстандарт: 20.046 – Работник по эксплуатации оборудования солнечных электростанций. (дата обращения 23.04.2026)
2. Генератор Ван де Граафа – как устроен и работает [Электронный ресурс] // Электрик Инфо. – Режим доступа: https://electrik.info/main/fakty/1476-generator-van-de-graafa.html (дата обращения: 22.04.2026).
3. Ильченко Л. И., Ильченко И. В. Генератор Ван де Граафа, синхротрон. Эфироны и природа синхротронного излучения // Научный журнал. – 2024. – № 147.https://scientificjournal.ru/images/PDF/2024/147/generator-van-de-graafa.pdf?ysclid=mok89bm2es543721491 (дата обращения 22.04.2026)

© Зиганшин А.А., 2026

УДК 621.313.322

П.А. ВАСИЛЬЕВ
*pashavasilev.2003@mail.ru*
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доцент Т.Р. ТЕРЕГУЛОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ САМОЛЕТА: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

*Аннотация*. Статья посвящена исследованию режимов работы синхронного генератора вспомогательной силовой установки; проведен анализ современных программных систем, обеспечивающих полный виртуальный цикл разработки.

*Ключевые слова*: генератор синхронный; силовая установка самолета; математическое моделирование.

Синхронный генератор вспомогательной силовой установки (ВСУ) самолета обеспечивает автономное электропитание приборов и агрегатов в самолете независимо от основной силовой установки. При моделировании режимов работы к генераторам самолетов предъявляются более строгие требования, чем к генераторам общепромышленного назначения из-за особенностей их конструкции, включая минимальные габариты и вес при заданной выходной мощности, устойчивость к вибрации, широкий рабочий диапазон температур и нестабильную скорость вращения вала.

Перед тестированием каждого режима на оборудованных приводных стендах выполняется математическое моделирование, позволяющее прогнозировать производительность генератора во всем спектре эксплуатационных и аварийных ситуаций на этапе разработки. В данной статье рассматриваются возможные режимы работы генераторов авиационных вспомогательных силовых установок, описываются методы их моделирования и представлены программные пакеты, используемые для виртуальных исследований.

1. Классификация и физика режимов работы генератора вспомогательной силовой установки (ВСУ).

1.1. Стационарные режимы

В установившемся режиме параметры генератора изменяются медленно или остаются постоянными.

Холостой ход (ХХ): возбуждение генератора без нагрузки. Основные цели данного исследования — определить характеристики намагничивания, отрегулировать автоматический регулятор напряжения и оценить зависимость ЭДС от тока возбуждения при различных скоростях вращения.

Номинальная нагрузка: работа при номинальной мощности (обычно 30–120 кВА в гражданской авиации). Изучаются падение напряжения, температурные изменения обмоток статора и сердечника, а также влияние коэффициента мощности (обычно 0,8) на ток возбуждения.

Частичная нагрузка (25–75%): наиболее распространенный режим работы. Характеризуется нелинейностью магнитной цепи, изменениями реактивного сопротивления и необходимостью поддержания стабильного напряжения при резких изменениях энергопотребления узлов и агрегатов.

1.2. Переходные и динамические режимы

Переходные процессы лежат в основе проверочных испытаний в соответствии со стандартами. К ним относятся:

Скачки нагрузки: пошаговое подключение/отключение 25%, 50% и 100% номинальной мощности в течение 0,1–0,5 с. Исследуются перерегулирование напряжения (допустимо ±5–10%), время восстановления (обычно <2 с) и колебания скорости вращения вала ВСУ под воздействием электромагнитного момента.

Изменение скорости: скорость вращения вала изменяется в определенном диапазоне частот, что приводит к пропорциональному изменению выходной частоты напряжения генератора. Моделируется влияние скорости вращения на индуктивное сопротивление, вихревые токи, работу выпрямительных мостов бесщеточного возбудителя.

1.3. Аварийный и нештатный режимы

Короткие замыкания: трехфазные, двухфазные и однофазные короткие замыкания на клеммах или в бортовой сети. Расчет импульсных токов, оценка электродинамических сил и времени срабатывания автоматических выключателей.

Фазовый обрыв и асимметрия нагрузки приводят к появлению токов отрицательной последовательности, перегреву ротора и пульсациям электромагнитного момента.

Потеря возбуждения и отказ автоматического регулятора напряжения, что приводит к полному падению напряжения. Моделирование необходимо для проектирования резервных контуров управления и переключения логики на альтернативные источники.

2. Математическое моделирование режимов.

2.1. Модель в осях d-q

Базовый инструмент для динамического анализа и разработки контроллеров. Уравнения записываются в системе координат, вращающейся синхронно с ротором:

Учет насыщения реализуется с помощью таблиц или аналитических приближений зависимостей $L_d$ ( $i_d$ , $i_q$ ) и $\Psi_f$ ( $i_f$ ). Модель позволяет синтезировать ПИД-регуляторы, нелинейные компенсаторы перекрестной связи и адаптивные алгоритмы регуляторов напряжения.

2.2 Конечно-элементные модели

Они создаются в специализированных электромагнитных пакетах. Они позволяют детально исследовать: распределение магнитной индукции в зубцах, ярме, воздушном зазоре; локальное насыщение и его влияние на индуктивность; потери в меди (с учетом скин-эффекта) и в стали (гистерезис + вихревые токи); температурные поля для комбинированного охлаждения (воздух/масло); механические напряжения, возникающие от центробежных сил и вибраций силового агрегата.

Результаты метода конечных элементов используются для калибровки параметров моделей d-q, преобразуя их из идеализированных в физически правдоподобные.

3. Программные среды и методы построения моделей

MATLAB/Simulink + Simscape Electrical:

d-q, эквивалентные схемы, логика управления, разработка АВР, анализ скачков нагрузки.

ANSYS Maxwell + Twin Строитель:

2D/3D FEM (метод конечных элементов), электромагнитно-тепловое совместное моделирование, точный расчет потерь, насыщения, температурных полей.

Исследование режимов работы синхронного генератора вспомогательной силовой установки требует многоуровневого подхода, сочетающего аналитические модели по осям d-q и электромагнитный анализ методом конечных элементов. Современные программные системы (MATLAB/ Simulink , ANSYS и платформы HIL (симуляторы) для аппаратного моделирования в цикле) обеспечивают полный виртуальный цикл разработки: от синтеза контроллера до проверки в реальном времени и подготовки к сертификационным испытаниям.

© Васильев П.А., 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 3.1 Электротехника и электроизмерения

*Афтахов Р.В.* Интерактивная модель переходных процессов в *RLC*-контуре в среде Google Colab..... 3
*Лаврухин М.В., Алланазаров Ж.А.* Как работает сенсорный экран: физика прикосновения..... 8
*Артемьев Э.Р.* Способы цифровой записи и воспроизведения аудиофайлов..... 11
*Тимергалиева К.Ю., Даутова А.Э.* Сравнительный анализ аналитического и численного решения уравнения диффузии при формировании эмиттерных областей биполярных транзисторов..... 17
*Деловеров Т.З.* Моделирование и анализ электронного измерительного тракта волоконно-оптического датчика радиального зазора лопаток газотурбинного двигателя..... 23
*Федотов А.Г.* Анализ и методы минимизации температурной погрешности магнитострикционных датчиков, интегрированных в гидроцилиндры..... 26
*Гейдаров Э.Т.* Методы борьбы с паразитными явлениями в СВЧ-платах..... 32
*Гилязиев Р.Р.* Физические и схемотехнические основы построения широкополосных средств радиоэлектронного подавления..... 37
*Григорьев А.Р.* Принцип работы и применение RC-цепей в современной электронике..... 42
*Ильясова А.И.* Исследование резонанса напряжений средствами схемотехнического моделирования..... 48
*Крылов М.В., Псыщаница А.С.* Покрытие алюминиевого сплава методом плазменно-электролитического оксидирования..... 53
*Лукманова А.Л.* Проблемы электромагнитной совместимости в БПЛА: влияние силовой части на навигацию и телеметрию..... 57
*Митрофанов А.А.* Цифровой термостат..... 61
*Мухамадиева А.А.* Введение в квантовые вычисления: схемотехника квантовых процессоров..... 65
*Нургалеев Т.Н., Муталлапов Т.А.* Умный улей..... 70
*Насибуллин А.Б.* Ультразвуковой уровнемер..... 76
*Назаров И.И.* Модуль LoRa E32-915T30S и перспективы его использования в БПЛА..... 81
*Путинцев Д.И.* Применение генератора заданной электрической мощности в измерительных системах контроля состояния мышц..... 85
*Сафина А.Р.* Источники питания для беспилотных летательных аппаратов..... 87

### Секция 3.2 Информационно-измерительная техника и авионика

*Аллагулов И.А.* Интеллектуальная система измерения и контроля вибрации авиационного двигателя..... 92

*Анисимов Д.О.* Система контроля и управления пожаротушением ГТД на отечественной элементной базе..... 96
*Антропов Р.И., Важов Д.И.* Эволюция отечественных микропроцессоров и современные проблемы импортозамещения..... 101
*Арефьев А.С., Муслимов Р.Р.* Анализ современных датчиков контроля загрязнения воздуха для обеспечения безопасных условий при выполнении технических работ..... 106
*Батыршин И.Ф.* Создание имитационной модели вращающегося трансформатора в среде SimInTech..... 112
*Бобров Г.И.* Блок автономной сенсорной сети LoRa..... 117
*Чертов И.А.* Информационно-измерительная система управления движением беспилотной платформы на основе искусственного интеллекта и стереозрения..... 122
*Деловеров Т.З.* Расчёт коэффициента оптической связи между торцом оптоволокна и фотоприёмником в датчике зазора лопаток газотурбинного двигателя..... 126
*Гайсин Д.А.* Анализ рынка UWB-модулей и особенности применения для навигации БПЛА..... 130
*Гибаев И.Н.* Методы повышения точности измерения тока в силовом контроллере для задач телеметрии БПЛА..... 134
*Губайдуллин В.Г., Ираев Д.Г.* Аппаратная платформа полётного контроллера как элемент конструкции БПЛА: требования к компоновке, надёжности и технологичности интеграции..... 138
*Хафизов Б.А.* Анализ методов определения состава водонефтяной эмульсии..... 141
*Ираев Д.Г., Губайдуллин В.Г.* Применение STM32N6 и машинного обучения для оценки состояния пчелиной семьи по аудио- и видеомониторингу..... 147
*Якименко А.А.* Магнитооптические датчики тока и магнитного поля..... 151
*Кодо Р.Р.* Реализация системы локального радиочастотного позиционирования в ограниченной зоне..... 156
*Кокорышкин Ф.Р.* Программное обеспечение для блока управления электронными устройствами..... 161
*Корепанов И.А.* Моделирование магнитного поля катушек Гельмгольца в пакете COMSOL Multiphysics..... 166
*Мавлембирдин Б.Р.* Система контроля параметров быстродействующих АЦП..... 171
*Муллахметова Е.О.* Разработка системы контроля параметров фрезерного станка с ЧПУ на основе тензометрических датчиков..... 174
*Мурзина А.А.* Автономная навигация роя БПЛА..... 178
*Панченко А.Д.* Экспериментальное исследование методов коррекции ошибок памяти для бортовых компьютеров спутника..... 184

**Секция 3.3 Биомедицинская инженерия**

*Абзалилова Я.Р.* Влияние регулярных физических нагрузок на сердечно-сосудистую систему студентов..... 188
*Аюпов Г.Т.* Структура автоматического внешнего (наружного) дефибриллятора..... 192
*Бабикова А.А.* Проблема анализа качественной оценки уровня физического здоровья при нестандартных значениях жизненных показателей..... 199
*Бабикова А.А.* Алгоритм цифрового мониторинга здоровья: математическая модель энергетического потенциала и классификация состояний..... 202
*Багаутдинова Д.Ш.* Информационно-измерительная система для расчёта показателей физического здоровья «Health Calculator» ..... 206
*Варакута Д.О.* Преимущества использования систем непрерывного мониторинга глюкозы для пациентов с сахарным диабетом..... 209
*Вильданов Р.И.* Инфузионный насос с микроконтроллерным управлением и автоматизированным контролем скорости вливания..... 212
*Гиззатуллина К.И.* Интерпретация результатов медицинских исследований на основе искусственного интеллекта: междисциплинарный подход..... 217
*Гиззатуллина К.И.* Искусственный интеллект в современной диагностике: алгоритмы, механизмы и трансформация роли врача..... 221
*Грачев А.А.* Система автоматизированной диагностики утечек в дыхательном контуре аппарата ИВЛ..... 225
*Ермакова Ш.Р.* Проектирование и отладка программно-аппаратной части флуориметрического анализатора для неонатального скрининга..... 230
*Заводчиков А.А.* К вопросу об обеспечении M2M-коммуникации при создании системы контроля параметров чистого помещения в ожоговых центрах..... 236
*Закирзянов М.У.* Имитационное моделирование аппарата магнитолазерной терапии с системой контроля параметров воздействия…. 240
*Иванова Е.Н.* Обзор мобильных приложений для контроля артериального давления: возможности и ограничения..... 243
*Иванова У.В.* Методика создания карты потока ценностей применительно к медицинскому учреждению Уфы..... 248
*Ишмуратова Р.М.* Проектирование лазерного аппарата для воздействия на биоткань..... 252
*Кочетова И.К.* Информационно-аналитическая система исследования уровня стресса у медицинских работников..... 256
*Кудаяров И.М.* Научный подход при разработке коагулометра..... 260
*Кудряшова Р.А.* Фетальный допплер в телемедицине: внедрение алгоритмов искусственного интеллекта для пренатального мониторинга..... 266

*Кулешов И.С.* Принципы работы и перспективы развития современных коагулометров (обзор)..... 271
*Кулешов И.С.* Интеллектуальная система интерпретации результатов коагулограмм как инструмент цифровизации здравоохранения…… 275
*Лежайская С.Д.* Использование искусственного интеллекта в биомедицинских системах..... 278
*Макарова К.С.* Интеллектуальные системы в диагностике невротических расстройств..... 280
*Макарова К.С.* Применение технологий обработки естественного языка для анализа речи и текста в диагностике невротических расстройств..... 285
*Молдыгалиев Н.А.* Формирование элементов в цифровом производстве культеприемных гильз..... 289
*Молдыгалиев Н.А.* Верификация алгоритма портативного ЭКС методом имитационного моделирования в SimInTech..... 294
*Морозов А.Б.* Тенденции развития современных бионических протезов: концептуальные подходы, актуальные прототипы и существующие ограничения..... 298
*Морозов А.Б.* История появления и развития протезов от примитивных искусственных конечностей до высокотехнологичных устройств..... 303
*Муругов С.С.* ЭМГ-сенсоры в протезах верхних конечностей..... 309
*Мухаметшин Р.А.* Инновационный подход при разработке устройства для диагностики и реабилитации обонятельных нарушений..... 312
*Рожкина А.А.* Предварительное улучшение визуального качества дерматологических изображений за счет применения цифровой фильтрации..... 316
*Сабитова Д.С.* Разработка принципиальной схемы гемоглобинометра..... 321
*Сафиуллин А.Р.* Протезно-ортопедические изделия и их обратное проектирование..... 324
*Султанмуратова А.Р.* Использование программного пакета Blender для проектирования персонализированных костных имплантатов..... 327
*Султанова И.Р.* Применение микроконтроллеров в тонометрах внутриглазного давления..... 333
*Фролова О.П.* Разработка принципиальной схемы аппарата для регистрации апноэ сна..... 336
*Хакимова Р.А.* Метод измерения эластичности кожи с помощью прибора Cutometer MPA 580: технические аспекты и метрологическое обеспечение 339
*Хузин Д.И.* Актуальность интраоральных сканеров в современной стоматологии..... 343
*Цибрин А.Ю.* Современные методы управления биоэлектрическими протезами: принципы, технологии и перспективы развития..... 349
**Секция 3.4 Инфокоммуникационные системы и технологии**
*Катаскин Л.В.* Анализ эффективности преднамеренных помех в системах радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.. 352

*Катеринкина Е.Н.* Оценка параметров беспроводного канала на основе волн с орбитальным угловым моментом..... 357
*Бажанов Д.С.* Применение технологии LoRaWAN для автоматизации поквартирной телеметрии в многоквартирных жилых домах..... 360
*Бурдина А.Ю.* Исследование и построение безэховой камеры..... 364
*Опомах П.С.* Подход к тестированию сетевых коммутаторов..... 367
*Галеев З.З., Фешкова П.А., Ситдиков С.У.* Разработка лабораторного стенда для исследования акустических сигналов на базе Arduino UNO и микрофона MAX9814..... 372
*Дудинов В.Н.* Повышение эффективности использования радиочастотного спектра с помощью технологии когнитивного радио..... 375
*Садриев Д.А.* Макет микрополосковых линий..... 380
*Иванов А.М.* Разработка системы передачи данных для автоматизированного передвижения маломерных судов на основе данных позиционирования..... 385
*Шагиахметов Р.Р.* Разработка комплекса для мониторинга электромагнитной обстановки и пеленгации источников излучения в диапазоне от 100 до 1500 МГц..... 388
*Байбурин Э.Р.* Разработка магнитного компаса с приемником навигационных сигналов для позиционирования маломерных судов..... 392
*Олькова Н.С., Нефедова Д.С.* Верификация гладкости и малошумности пространства политик аугментации изображений..... 396
*Нефедова Д.С., Олькова Н.С.* Гауссовское суррогатное моделирование в задаче байесовской оптимизации политик аугментации..... 401
*Латыпов Д.А.* Проектирование мобильной сети передачи данных стандарта LTE в клинике «Меги» город Уфа для ПАО «Вымпел-Коммуникации»..... 407
*Галеев З.З., Лисин А.Е., Мелконян Г.А.* Переход от 5G к 6G: особенности, технологии и проблемы внедрения..... 410
*Лисин А.Е., Мелконян Г.А., Нурутдинов А.Э.* Сравнительный анализ оконных функций при спектральном анализе сигналов с использованием измерительного прибора OSA103F..... 413
*Антипова В.Е.* Алгоритм поиска сигналов в гидроакустических системах связи в бурении..... 418
*Абдульменов Д.Т.* Разработка лабораторного стенда для управления акустическими данными..... 424
*Хакимов О.М.* О маршрутизации данных в сетях беспилотного транспорта..... 427
*Сальников Р.О.* Снижение пик-фактора сигнала в каналах управления БПЛА на базе гибридных сетей 5G/6G..... 429
**Секция 3.5 Электромеханические и электроэнергетические системы**
*Ахмадеев А.О.* Анализ материалов для систем возбуждения интегрированного стартер-генератора..... 434

*Ахметшин А.Р.* Автоматика ограничения перегрузки оборудования с адаптивными уставками по току..... 437
*Бабаков И.В.* Диагностирование дефектов в силовом трансформаторе по результатам АРГ..... 440
*Андреев А.К.* Разработка математической модели компенсации реактивной мощности в электрической сети с использованием STATCOM 446
*Ахметянов А.Р.* Технико-экономический и эксплуатационный анализ при переходе от традиционных к цифровым подстанциям..... 451
*Бывальцев А.Е.* Разработка программы повышения квалификации «Оператор БПЛА», применяемой для реабилитации раненых СВО..... 460
*Бывальцев А.Е.* Ферропорошковые тормоза для стыковочных устройств 463
космических аппаратов.....
*Бочков Д.А.* Расчёт температуры основной изоляции высокотемпературного сверхпроводникового кабеля..... 469
*Богданов Б.Е.* Актуальность применения плазменных систем зажигания в современных авиационных двигателях..... 474
*Бородин Д.С.* Конструкции обмоток статоров на печатной плате для аксиальных двигателей..... 478
*Букреев М.Е.* Сравнительный анализ подходов к учету противоаварийной автоматики при расчете режимов электрической сети... 483
*Чирков М.С.* Оптимизация расположения фазных проводов в компактных линиях электропередачи для повышения естественной мощности..... 487
*Чорба В.К.* Разработка и анализ генератора повышенной мощности для бортовой сети автомобиля..... 494
*Еникеев И.Э.* Отказ источников питания в полете гражданского самолета... 469
*Федоров Р.А.* Коэффициент с повышенной чувствительностью для выявления витковых замыканий в силовых трансформаторах на холостом ходу..... 502
*Галиева А.А.* Современные направления цифровизации и программирования в электрических машинах..... 507
*Гарипова Э.М., Шарипова А.Р.* Обзор видов и сравнительный анализ электрических двигателей в транспорте..... 510
*Гринин Г.А.* Использование компьютерного зрения на этапе визуального контроля при капитальном ремонте печатных плат..... 513
*Гусев Д.С., Закирничный Е.Г.* Калибровка микроомметра ИКС-200А..... 517
*Хибатуллин Д.Р.* Аморфные трансформаторы в распределительных сетях: преимущества, ограничения и мировой опыт внедрения..... 523
*Хибатуллин Д.Р.* Влияние аморфных магнитопроводов на качество электроэнергии и надёжность работы распределительных сетей…….. 527
*Исхаков А.А.* Анализ применения бесщеточных (*BLDC*) электродвигателей для привода робототехнических манипуляторов…… 531
*Ишмухаметов Л.Ю.* Вертикально-осевые ветроэнергетические установки на базе ротора Дарье: анализ преимуществ и эксплуатационных ограничений в бытовом применении..... 534

*Киекбаев Д.И.* Применение генератора *S*-образных траекторий для управления электроприводом..... 538
*Кириллов Р.С.* Обзор современных материалов для асинхронных двигателей: изоляция, провода и конструкционные сплавы…….. 541
*Кожух И.А.* Сравнение различных типов синхронных двигателей приводов компрессоров..... 545
*Кудрявцев Н.С.* Российские системы автоматического проектирования электротехнических комплексов и систем..... 548
*Макаров Н.С.* Сравнительный анализ эффективности гибридных силовых установок на базе различных типов тепловых двигателей для легкого многоцелевого самолета..... 553
*Маркелов П.К.* Анализ преимуществ применения асинхронных двигателей атомного исполнения серии АДМА на объектах Росатома..... 557
*Миргалиев А.А.* Современные методы управления высокоскоростными машинами..... 560
*Васфиев А.И.* Анализ эффективности функции автоматического ограничения перегруза оборудования с адаптивной уставкой по току…….. 565
*Николаева А.А.* Основы NanoCAD в учебном проектировании..... 569
*Никонов А.О.* Повышение энергоэффективности и надежности насосных агрегатов для перекачки нефти с применением синхронных взрывозащищенных двигателей комбинированного исполнения Ex ep…… 573
*Нургалиев А.Ф.* Двигатель синхронный реактивный с катящимся ротором для инвалидной коляски..... 577
Нзупет Чавуа А.Р. Проектирование электродвигателя для транспортного средства..... 581
*Пахомов С.А.* Электронасос бытовой центробежный..... 583
*Сахияров Ф.А., Кутдусов И.А.* Причины перегрева обмоток статора и методы их контроля..... 588
*Щекатуров И.А.* Повышение устойчивости силовых трансформаторов к геоиндуцированным токам на основе комплексирования систем мониторинга и активной части..... 591
*Щербакова А.А.* Разработка двигателя для реабилитационного тренажёра пассивной разработки локтевого сустава..... 595
*Сергеев А.С.* Анализ и современные тенденции развития электроприводов откатных ворот..... 597
*Шакиров А.М.* Исследование и выбор оптимальных параметров асинхронного двигателя для компрессорной установки..... 601
*Шарафутдинова А.Н.* Высоковольтные приборы электрической энергии для коммерческого учета..... 603
*Шевцов И.С.* Обзор методов плавки гололеда на ЛЭП..... 607
*Сидоров А.С.* Исследование перспектив развития конструкций асинхронных двигателей для частотно-регулируемого привода…… 612
*Сиразитдинов О.Б.* Герметичный синхронный двигатель дискового типа для ядерно-химического производства..... 616

*Табишев А.Р.* Анализ способов возбуждения синхронных генераторов в составе дизель-генераторных установок..... 620
*Зиганшин А.А.* Генератор Ван де Граафа как представитель класса ёмкостных электрических машин: преимущества, недостатки и перспективы..... 626
*Васильев П.А.* Режимы работы синхронного генератора вспомогательной силовой установки самолета: математическое моделирование и программные средства исследования..... 629

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat − текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

*Научное издание*

**МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

**Том 3**

***Материалы***
***XX Всероссийской молодёжной научной конференции***
***(г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.)***

*Электронное издание сетевого доступа*

*За достоверность информации, изложенной в статьях,*
*ответственность несут авторы.*
*Статьи публикуются в авторской редакции*

Подписано к использованию 06.07.2026 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 20,20 Мб.
Заказ 181.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»*
*450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: red@uust.ru