

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

*Международная научно-практическая конференция*



**Уфа 2022**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

*Международная научно-практическая конференция*

Научное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ  
ISBN 978-5-4221-1571-6

Уфа 2022

Электротехнические комплексы и системы : материалы Международной научно-практической конференции [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2022. – URL: [https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/2022-22pdf](https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-22pdf)

Содержатся статьи, включенные в программу Международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы», состоявшейся в г. Уфе 16–18 ноября 2021 г. Основные тематики сборника связаны с электротехническими комплексами и системами, электромеханикой, электроэнергетикой, электрооборудованием, электротранспортом и электрооборудованием летательных аппаратов, альтернативной энергетикой и современными информационными и цифровыми технологиями в энергетике, перспективными материалами в электротехнике.

**Редколлегия:**

В. Е. Вавилов – зав. кафедрой ЭМ УГАТУ, д-р техн. наук, доцент (ответственный редактор)

Ф. Р. Исмагилов – профессор кафедры ЭМ УГАТУ, д-р техн. наук, профессор (зам. ответственного редактора)

Д. В. Гусаков – доцент кафедры ЭМ УГАТУ, канд. техн. наук

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

*Материалы публикуются в авторской редакции.*

Компьютерная верстка *А. А. Шарипова*

Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

*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.*

Подписано к использованию: 05.03.2022

Объем: 11,2 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik@ugatu.su

## **Оргкомитет конференции:**

С. В. Новиков – ректор УГАТУ, канд. экон. наук, доцент (председатель)

Ф. Р. Исмагилов – профессор кафедры ЭМ УГАТУ, д-р техн. наук, профессор (зам. председателя)

В. Е. Вавилов – зав. кафедрой ЭМ УГАТУ, директор НИИ «ЭТКиС» УГАТУ, д-р техн. наук, доцент (зам. председателя)

Р. Д. Еникеев – первый проректор по науке УГАТУ, д-р техн. наук, профессор (зам. председателя)

Г. К. Агеев – проректор по инновационной деятельности УГАТУ, канд. техн. наук, доцент (зам. председателя)

М. В. Охотников – директор ООО «ИНПЦ «ЭНЕРГИЯ-УГАТУ», канд. техн. наук, доцент

Д. В. Гусаков – доцент кафедры ЭМ УГАТУ, канд. техн. наук

*Гайдай М. С., Добродеев А. В., Мосин С. А.*  
Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»

## **ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ПРАВИЛ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Аннотация:* В статье рассмотрены требования Авиационных правил, Часть 33 «Нормы летной годности двигателей воздушных судов» в области обеспечения пожарной безопасности п. 33.17(е)(2\*). Предложен путь обеспечения эквивалентного соответствия требованиям АП-33 электронного блока САУ, который позволяет избежать значительного увеличения габаритов и массы САУ ТРДД.

*Ключевые слова:* электронный регулятор, газотурбинный двигатель, двухконтурный двигатель, пожарная безопасность, авиационные правила, эквивалентное соответствие, система автоматического управления, компоненты системы управления, пожароопасная зона, огнестойкость.

Разработка авиационных двигателей сложный, наукоемкий процесс, требующий комплексных решений, в том числе, вопросов качества и надежности. В ходе разработки перед конструктором стоит задача обеспечить высокие требования надежности и безотказности, от которых зависит экономическая составляющая эксплуатации двигателей. Надежность и безотказность являются основными техническими характеристиками качества двигателей, наряду с такими качествами как удельный расход топлива, удельный вес. При этом если двигатель не обладает высокой надежностью и безотказностью, то все остальные показатели качества теряют свое практическое значение.

Для обеспечения качества, надежности и долговечности авиационных двигателей гражданской авиации введены в действие Авиационные правила, Часть 33 «Нормы летной годности двигателей воздушных судов» (1-е издание – 1994 г.; 3-е издание (поправки 33-1 и 33-2) – 2012 г.) [1], далее АП-33. При этом обязательный порядок сертификации и контроля за соответствием регламентирован действующими Федеральными авиационными правилами «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21» [2].

Главный этап завершения разработки – это проведение комплекса работ по сертификации, подтверждение соответствия требованиям авиационных правил и получение сертификата типа.

В данной статье авторы рассматривают пути обеспечения соответствия пункту 33.17(e)(2\*), согласно которому «Компоненты системы управления двигателем, которые расположены в пожароопасной зоне, должны быть, по крайней мере, огнестойкими» на примере существующих конструктивных исполнений двухконтурных авиационных двигателей гражданской авиации.

Пути реализации обеспечения конструкции компонентов системы управления соответствия данным нормам авиационных правил оказывают существенное влияние на надежность, безотказность и, как следствие, на безопасность полетов. В свою очередь реализация конструктивного исполнения компонентов системы управления определяет и массогабаритные характеристики как двигателя, так маршевой силовой установки в целом.

В соответствии с действующей редакцией п. 33.17(e)(2\*) АП-33 компоненты системы управления, которые расположены в установленной пожароопасной зоне, должны быть по крайней мере огнестойкими (способным выдерживать пламя с температурой  $1100 \pm 80^{\circ}\text{C}$  как минимум в течение 5 минут при выполнении своих функций).

В соответствии с CS-E 130 [3] предъявляется требование как минимум огнестойкости к компонентам САУ, установленным в пожароопасной зоне. Однако под определением огнестойкости в европейских авиационных правилах не подразумевается выполнение компонентом всех его функций, требуется лишь отсутствие опасных последствий в течение заданного периода времени по причине отказа рассматриваемого компонента.

В большинстве случаев электронный регулятор двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) гражданской авиации размещаются в пожароопасной зоне на корпусе вентилятора (рис. 1). Данное размещение обуславливается благоприятным температурным режимом по типовому полетному циклу двигателя, удобством подходов для технического

обслуживания в эксплуатации, минимизацией длины, а следовательно и веса, кабельно-жгутовой обвязки. Вместе с тем, при таком размещении электронного регулятора, он подпадают под требования п. 33.17(е)(2\*) АП-33 и должен быть выполнен в огнестойком исполнении.

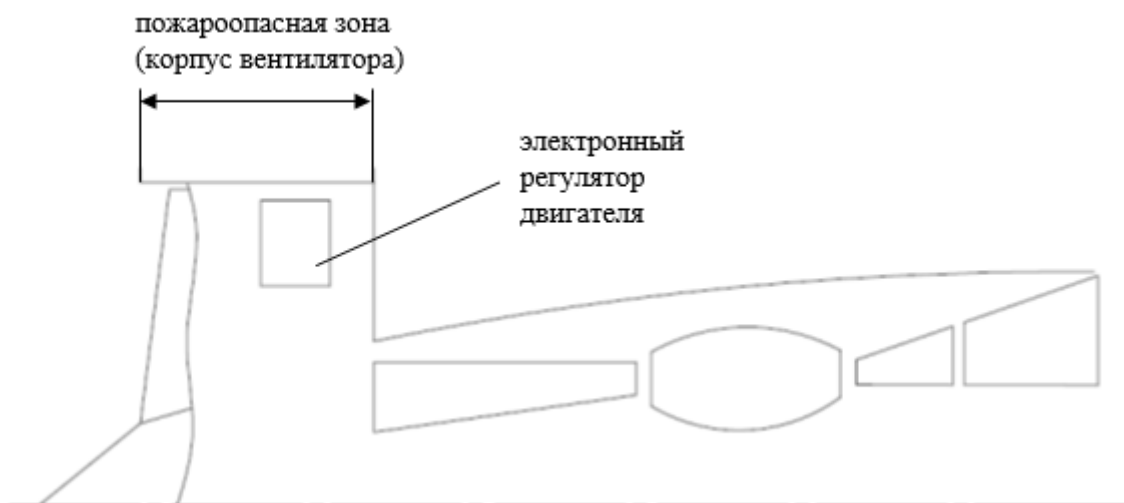


Рис. 1. Типовая схема размещения электронного регулятора на ТРДД гражданской авиации

Для обеспечения требований п. 33.17(е)(2\*) АП-33 электронным регулятором двигателя существует несколько конструктивных решений:

- выполнение огнестойкого кожуха вокруг корпуса регулятора;
- охлаждение корпуса электронного регулятора топливом.

Каждое из данных решений приводит к существенному увеличению габаритов и массы электронного регулятора, а в случае применения охлаждения корпуса электронного регулятора топливом и к дополнительным коммуникациям топливной системы.

По оценкам, электронный регулятор (с реализацией в т.ч. функций контроля и диагностики) современного ТРДД в не огнестойком исполнении может иметь массу порядка 16 кг и ориентировочные габариты 400x350x150 мм, а аналогичный регулятор в огнестойком исполнении будет иметь массу порядка 28 кг и габариты 500x400x200 мм, в случае выполнения огнестойкого кожуха вокруг корпуса регулятора. Дополнительно при выполнении электронного регулятора в огнестойком исполнении необходимо также



выполнить в огнестойком исполнении все входящие и исходящие из регулятора кабельные линии, расположенные в огнеопасной зоне, что еще больше увеличивает суммарную массу САУ с огнестойким исполнением электронного регулятора.

Реализация электронного регулятора в огнестойком исполнении в соответствии с п. 33.17(е)(2\*) АП-33 приведет к существенному увеличению массы двигателя по сравнению с двигателями аналогами, сертифицированными в соответствии с CS-E 130 и может привести к неконкурентоспособности двигателя на рынке ТРДД.

В связи с этим целесообразно выполнять разработку электронного регулятора ТРДД в не огнестойком исполнении при этом комплексом мероприятий обеспечить эквивалентное соответствие электронного регулятора п.33.17(е)(2\*) АП-33.

В частности, для исключений опасных последствий при перегреве регулятора вследствие пожара (например, для исключения неконтролируемого увеличения расхода топлива, которое приведет к превышению частот вращения роторов максимально допустимых значений и, как следствие, к нелокализованному разрушению ТРДД), необходимо при достижении внутри корпуса электронного регулятора критической температуры, вследствие пожара, реализовать прекращение подачи топлива и отключение электронного регулятора от электропитания. При этом узлы крепления электронного регулятора на ГТД должны обеспечить надежное крепление регулятора в течение 5 минут в условиях пожара с температурой  $1100 \pm 80$  °С. Кроме того, необходимо предусмотреть огнестойким линии связи кабины пилотов с электромагнитом останова в дозаторе топлива, что, дополнительно к вышеперечисленному, позволит выполнить ручной останов ТРДД в случае пожара.

Дополнительным уровнем обеспечения безопасности может быть блок защиты двигателя от раскрутки роторов, расположенный в не пожароопасной зоне, который в случае неконтролируемой раскрутки роторов двигателя выдаст

сигнал в дозатор топлива на прекращение подачи топлива. Его линии связи с дозатором топлива и с датчиками частоты вращения роторов так же должны быть огнестойкими (как и датчики частоты вращения).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен путь обеспечения эквивалентного соответствия требованиям п. 33.17(е)(2\*) АП-33, который позволяет избежать значительного увеличения габаритов и массы САУ ТРДД, что положительно повлияет на конкурентоспособность отечественных ТРДД в части массы и габаритов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные правила, Часть 33 «Нормы летной годности двигателей воздушных судов» – 79 стр., издание – ОАО «АВИАИЗДАТ», 2012 г.
2. ФАП-21 – Федеральные авиационные правила «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21»
3. Сертификационные технические требования и приемлемые методы установления соответствия для двигателей (CS-E). Приложение VII к Решению ED 2020/006/R.

*Будилов И. Н., Лукащук Ю. В.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАХ**

*Аннотация:* Приводятся алгоритм и результаты расчета электромагнитных и гидродинамических полей в расплаве алюминия в ванне промышленного электролизера, выполненные с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, электролизер, производство алюминия.

## ВВЕДЕНИЕ

Технология получения алюминия является физически очень сложным, чрезвычайно энергоемким и дорогостоящим процессом, что существенно затрудняет экспериментальные исследования в этой области. В связи с этим общепризнанной мировой практикой является экспертиза технических решений

с использованием компьютерных моделей в области совершенствования конструкции и технологии алюминиевых электролизеров. Расчет процесса требует учета электромагнитных, тепловых, прочностных и гидродинамических явлений и предъявляет высокие требования к возможностям используемых средств численного моделирования. Адекватный расчет, дающий детализированное представление о подробностях процесса, является одним из первостепенных условий экономически эффективного производства.

## 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ

Циркуляция алюминиевого расплава в ванне электролизера обусловлена совместным действием на него электромагнитных сил, сил вязкостного трения, гидростатического давления и силы тяжести. Рассматриваемая в работе модель предполагает, что расплав является несжимаемой изотропной жидкостью, для которой справедлива гипотеза прилипания. Течение исследуется в трехмерной области, соответствующей ванне реального электролизера, и предполагается стационарным и турбулентным, описываемым  $k$ - $\varepsilon$  моделью. Влияние движения расплава на возмущение электромагнитного поля в первом приближении не учитывается. Предполагается также, что расплав не имеет поверхностей раздела и ограничен со всех сторон твердой стенкой.

Система уравнений математической модели включает в себя [1]:

- уравнение неразрывности  $\operatorname{div} \mathbf{w} = 0$ ; (1)

- уравнение количества движения в форме Навье-Стокса

$$(\mathbf{w}\nabla)\mathbf{w} = -\frac{1}{\rho}\mathbf{grad}p + \nu\Delta\mathbf{w} + \mathbf{g} + \mathbf{f}_m, \mathbf{f}_m = \frac{1}{4\pi\rho}[\mathbf{H} \cdot \operatorname{rot}\mathbf{H}]; \quad (2)$$

- уравнения Максвелла  $\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \operatorname{div} \mathbf{E} = 0, \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ ; (4)

- уравнение для плотности электрического тока  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ ; (5)

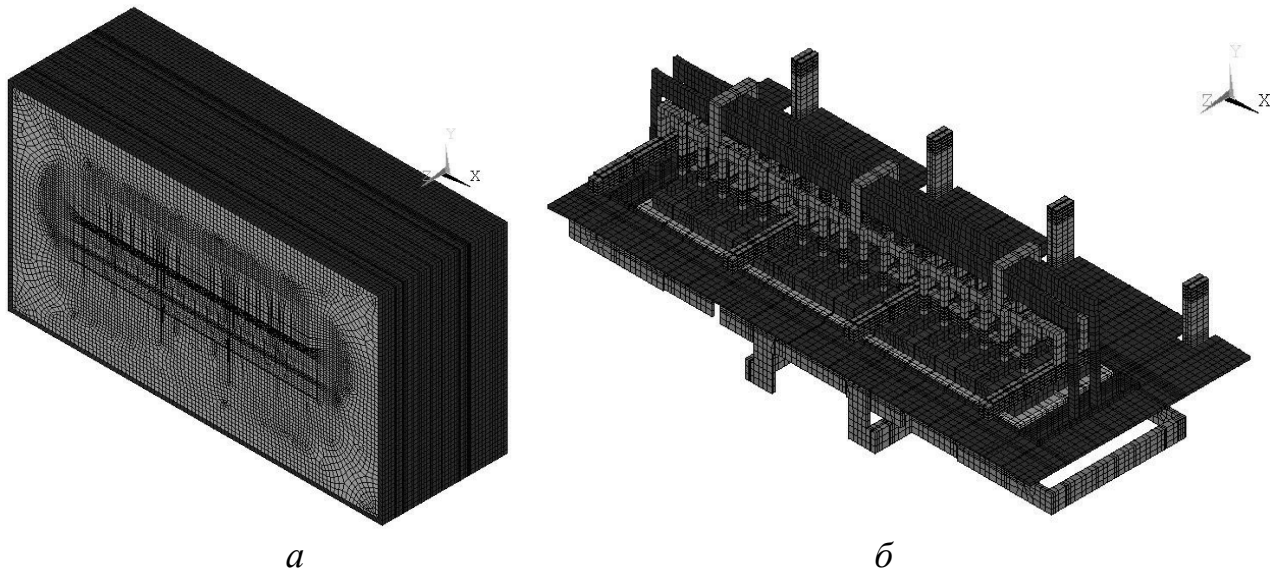
- уравнение магнитной индукции  $\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H}$ ; (6)

- уравнение энергии  $c\rho\mathbf{w} \cdot \operatorname{grad} T = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \eta\Phi + \frac{\mathbf{j}^2}{\sigma}, \Phi = \frac{1}{2\rho} \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_k} + \frac{\partial w_k}{\partial x_i} \right)$

## *2. ОПИСАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ*

Основу расчетного модуля составляет один электролизер, окруженный воздушным пространством, замкнутым областью специальных элементов, обеспечивающих задание граничных условий на бесконечности. Модуль имеет минимально допустимый размер окружающего воздушного пространства и ориентирован на составление цепей из нескольких последовательно соединенных электролизеров, образующих связанную электрическую цепь. Наиболее полный учет факторов, влияющих на конфигурацию магнитного поля, достигается в моделях, в которых электролизеры и шинопроводы, в том числе и компенсационные, находятся внутри общего воздушного пространства, окруженного областью с граничными условиями, заданными на бесконечности.

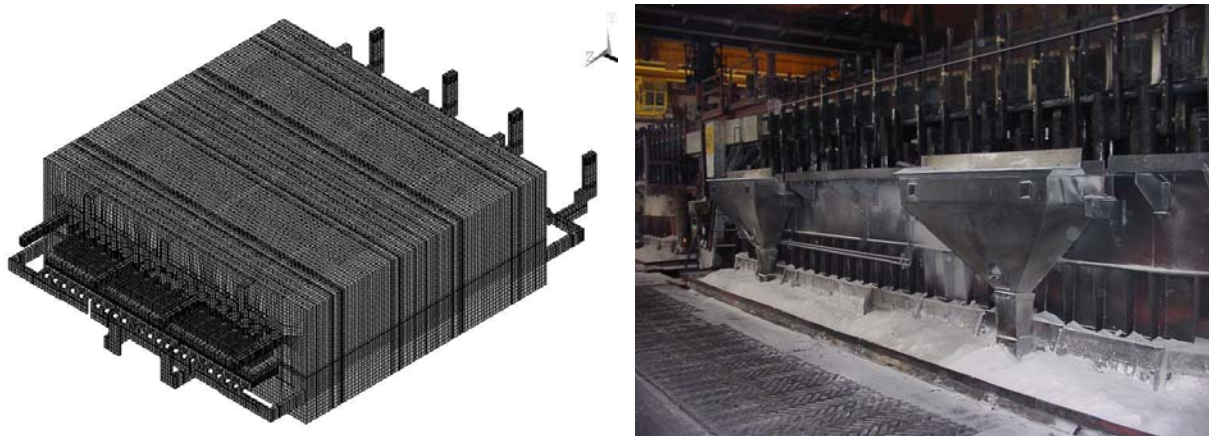
На рис. 1 в качестве примера показан расчетный модуль одного из видов отечественных электролизеров. Особенности модели является то, что максимально близко к реальной воспроизведена геометрия всех токопроводящих элементов электролизера, включая ванну, анодную и катодную ошиновки, а также наиболее массивных элементов, выполненных из ферромагнитных материалов: катодного кожуха, анодных балок, металлического покрытия пола. Элементы конструкции, не проводящие электрический ток и не являющиеся ферромагнетиками, в геометрическую модель не входят, поскольку не оказывают влияния на решение поставленной задачи. Тем не менее, области, занятые этими элементами, были подвергнуты конечно-элементной дискретизации с относительной магнитной проницаемостью  $\mu = 1$ , в силу необходимости передачи через них магнитного поля.



*Рис. 1. Конечно-элементная модель отечественного электролизера для получения алюминия:*

*а – расчетный модуль, охватывающий воздушным пространством один электролизер; б – КЭМ электролизера внутри воздушного пространства*

Серийные расчеты выполнялись на более сложных моделях рис. 2, представляющих собой последовательное соединение модулей, показанных на рис.1 и позволяющих учитывать влияние соседних электролизеров и цеховых электрических цепей.



*Рис. 2. Серийные расчетные МКЭ модули для учета взаимного влияния на распределение компонент вектора магнитной индукции соседних электролизеров*

### 3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Решение поставленной задачи в системе ANSYS [2] выполнялось последовательно в три этапа. На первом этапе решалась задача определения плотности электрического тока во всех токопроводящих элементах, включая расплав. Для этого решается система уравнений Максвелла (4). Решение

выполнялось методом скалярного электрического потенциала [2] на основании соотношения  $\mathbf{E} = -\text{grad}\phi$ , где  $\phi$  – электрический потенциал,  $B$ .

В качестве граничных условий, необходимых для получения однозначного решения, задавалось распределение тока серии по стоякам анодной ошиновки. Второй этап состоит в определении магнитного поля электролизера. Поскольку в модели имеются ферромагнитные области, образующие замкнутые контуры (например, корпус), то для решения используется обобщенный метод скалярного магнитного потенциала – метод GSP (General Scalar Potential) [3]. В этом случае искомый вектор напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  представляется в виде суммы двух составляющих:  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_g - \text{grad}\psi$ , где  $\mathbf{H}_g$  – некоторое приближенное значение напряженности поля, а  $\psi$  – обобщенный магнитный потенциал. Подробно метод GSP, предполагающий четырехшаговую процедуру поиска решения, описан в работе [3]. При решении для ферромагнетиков электролизера зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля  $\mu(H)$  определяется в программе ANSYS на основании вводимой аппроксимации для кривой намагниченности  $B(H)$ , которая в нашем случае была взята из работы [4]. При решении используется конечный элемент Solid 5.

На третьем этапе ищется решение собственно гидродинамической задачи, состоящей в решении системы уравнений, при этом областью поиска решения является только область расплава, в качестве расчетного используется конечный элемент Fluid 142. Значение вектора плотности массовых электромагнитных сил  $\mathbf{f}_m$ , действующих на расплав, рассчитываются по соотношению (3) на основании полученного на предыдущем этапе вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  с использованием автоматической процедуры интерполяции на новую сетку. В качестве граничных условий для уравнения движения используется условие прилипания  $\mathbf{w}|_{\Gamma} = 0$ , для уравнения энергии – граничные условия первого рода  $T|_{\Gamma} = T_w(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{r} \in \Gamma$ , где  $\Gamma$  – поверхность расчетной области,  $T_w(\mathbf{r})$  – известное значение температуры на границе, получаемое из решения тепловой задачи.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Эффективная работа электролизеров существенно зависит от распределения компонент вектора магнитной индукции в расплаве.

Особое внимание уделяется вертикальной ( $B_z$ ) компоненте магнитного поля. Для обеспечения достаточного запаса МГД устойчивости электролизеров большой мощности необходимо, чтобы магнитное поле отвечало следующим требованиям:

- поле по  $B_z$  компоненте должно иметь как можно больше перемен знака по продольному направлению и быть симметричным относительно осей ванны;
- условие частой перемены знака  $B_z$  является приоритетным даже по отношению к абсолютной величине этой компоненты в расплаве.

Оценка неуравновешенности вертикальной компоненты вектора магнитной индукции осуществлялась на основании следующих характеристик:

- среднеинтегральное значение  $B_z$ :  $\bar{B}_z = \frac{1}{V} \int_V B_z dV \approx \frac{\sum B_z^{(e)} V^{(e)}}{\sum V^{(e)}}$ ;
- среднеинтегральное значение  $|B_z|$ :  $|\bar{B}_z| = \frac{1}{V} \int_V |B_z| dV = \frac{\sum B_z^{(e)} V^{(e)}}{\sum V^{(e)}}$ ;
- коэффициент относительной неравномерности вертикальной составляющей магнитной индукции:  $K = \frac{\bar{B}_z}{|\bar{B}_z|} \cdot 100\%$ .

Существенной особенностью рассматриваемого электролизера является четырехстоячная ошиновка симметричная относительно поперечной оси, которая имеет более сложный характер распределения тока в анодной ошиновке. Конструкция катодной ошиновки более проста. Для определения характера распределения тока серии по четырем подводящим стоякам использована расчетная модель, представляющая собой электрическую цепь из пяти электролизеров (рис. 3). В результате интегрирования плотности тока по подводящим элементам каждого стояка установлено следующее распределение: 27,5 %; 22,6 %; 22,5 %; 27,4 %, использованное при проведении магнитно-гидродинамических расчетов.

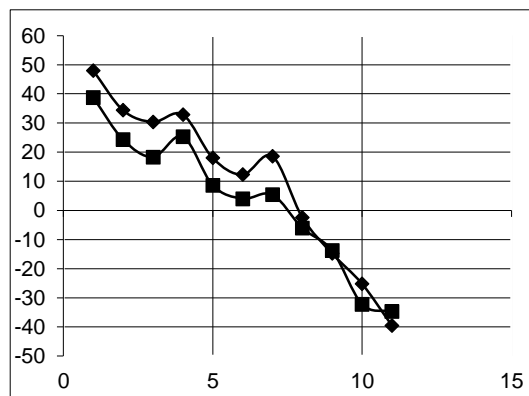
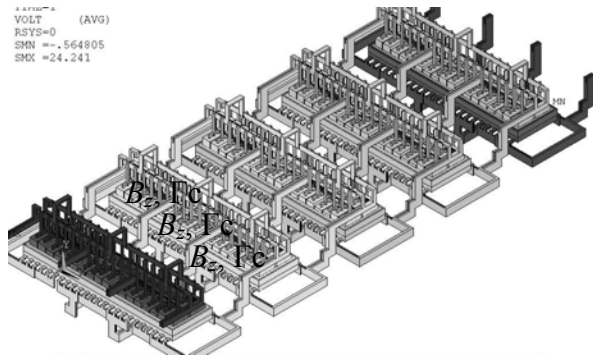


Рис. 3. КЭМ электрической цепи (а) и сопоставление результатов замеров и расчетов вертикальной компоненты вектора магнитной индукции  $B_z$  (Гс) на выходной стороне электролизера

Сравнение расчетных напряжений с результатами замеров, проведенных в цехе и полученных в результате моделирования показал, что рабочее напряжение на электролизере расчет на КЭМ составило 4,34 В, а по данным замеров 4,20 В; падение напряжения в аноде 0,43 и 0,43 В; падение напряжения в подине 0,39 и 0,35 В.

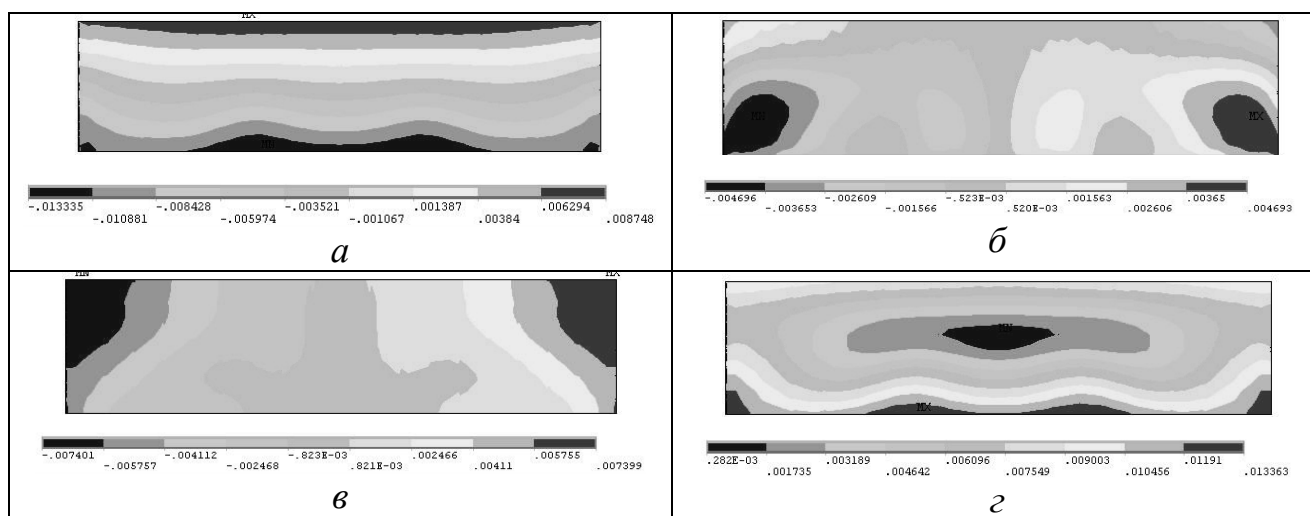


Рис. 5. Компоненты вектора магнитной индукции (Тл) в среднем планарном сечении металла:  
 $a - B_x$ ;  $б - B_z$ ;  $в - B_y$ ;  $г - B_\Sigma$

Результаты расчетов позволяют анализировать характер распределения компонент вектора магнитной индукции во всех основных элементах конструкции. На рис. 5 в качестве примера приведены картины распределения компонент вектора магнитной индукции в среднем планарном сечении металла



и шпангоутном катодном кожухе, выполненном из ферромагнитного материала. Эти данные представляют интерес при оценке устойчивости параметров технологического процесса. Качественное сравнение картин течения возможно по числу и конфигурации вихрей в среднем планарном сечении металла рис.6. Картина циркуляции металла имеет симметричный характер, хорошо выражены четыре вихря и система вихрей меньшей интенсивности у левой и правой границ. Максимальная скорость металла не превышает 0,18 м/с. Коэффициент относительной неравномерности вертикальной составляющей магнитной индукции в соответствии с данными расчетов  $K=0,19$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана высокая эффективность использования программного комплекса ANSYS для решения связанных (мультифизических) задач моделирования магнитно-гидродинамических процессов в промышленных электролизерах для получения алюминия. Характер распределения компонент вектора магнитной индукции, полученных при замерах и в расчетах, совпадает с приемлемой для практики точностью. Расчетные величины рабочих напряжений и падений напряжений на отдельных элементах близки к замерам. Это позволило использовать разработанные модели в частности для анализа параметров ошиновки при модернизации участка цеха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.VIII. Электродинамика сплошных сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 656 с.
2. Будилов И.Н., Лукашук Ю.В. Моделирование течений алюминиевого расплава в ванне электролизера методом конечных элементов. Вестник УГАТУ: Изд. УГАТУ, - 2007, т.9, №1(19). - С.133-139.
3. ANSYS Theory Reference. Electromagnetic Field Fundamentals. Ninth Edition. SAS IP, Inc.
4. Калужский Н.А., Скворцов А.П. Павлов А.В. и др. Исследование магнитных свойств ферромагнитных элементов конструкций алюминиевых электролизеров // Технико-экономический вестник БрАЗа. 2002 – №5. – С. 57-60.

*Люттов А. Г., Новоженин М. Б.*

МИРЭА – Российский технологический университет

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСАХ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Аннотация:* В центробежных насосах, входящих в состав электротехнических комплексов, при определенных режимах возникают гармонические колебания, которые приводят к различным нестационарным гидравлическим процессам. В статье производится исследование условий возникновения данных колебаний на основе методологии электроанalogии.

*Ключевые слова:* насосный комплекс, электроцентробежный насос, гармонические колебания, напорно-расходная характеристика.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Насосные комплексы (НК) на основе электроцентробежных насосов, применяемые в промышленности в составе электротехнических комплексов, нашли широкое применение. Высокий КПД, большое поле рабочих характеристик электроцентробежных насосов позволяют выделить данный тип как наиболее предпочтительный.

К одному из негативных факторов при работе НК относится то, что при определенных режимах могут возникать гармонические колебания, которые приводят к различным нестационарным гидравлическим процессам. Определение условий возникновения колебательных процессов, выявление соответствующих областей для выбора рациональных режимов работы НК является важной и актуальной задачей [1].

Основной характеристикой насосного комплекса, отражающей изменение режима работы является напорно-расходная характеристика (НРХ). С ее помощью можно определить рабочую точку как пересечение характеристики сети (с увеличением расхода происходит увеличение и напора) и характеристики центробежного насоса (с увеличением расхода уменьшается напор). Изменение рабочей точки из одной области в другую также приводит к изменению режима работы.

Для исследования динамических процессов в насосном комплексе целесообразна линеаризация характеристик в области рабочей точки НРХ. При описании динамических процессов насосного комплекса можно воспользоваться значениями дифференциальных сопротивлений

$$R_c = \left. \frac{dH_c}{dQ} \right|_{Q_0} > 0, \quad R_{цн} = \left. \frac{dH_{цн}}{dQ} \right|_{Q_0} < 0, \quad \text{где } R_c \text{ - сопротивление сети, } R_{цн} \text{ -}$$

сопротивление центробежного насоса (рис. 1).

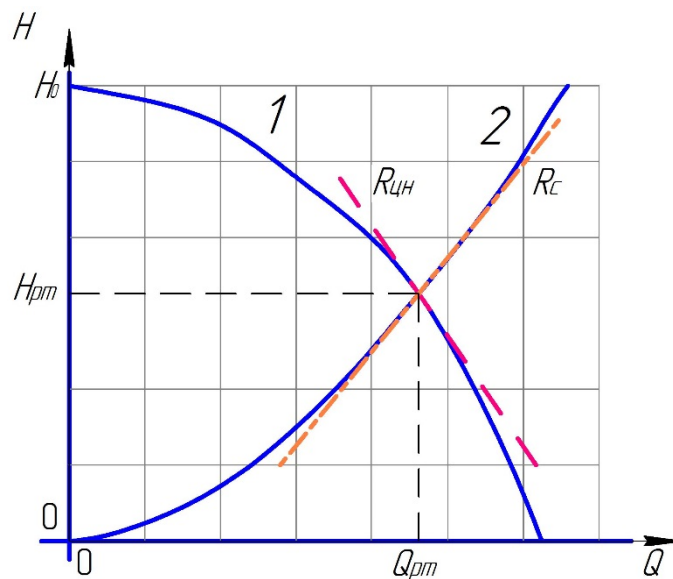


Рис. 1. НРХ сети и центробежного насоса

Рассмотрим модель насосного комплекса, сформированную с помощью метода электроанalogии (рис. 2).

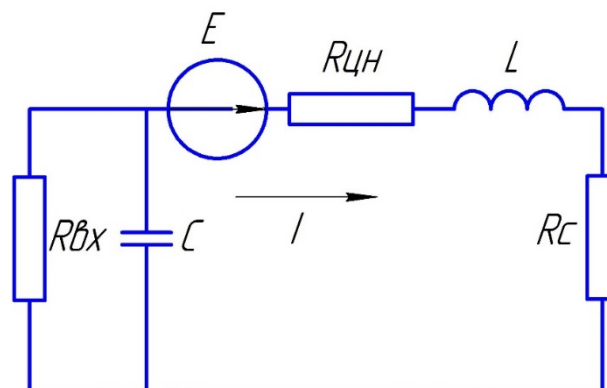


Рис. 2. Модель насосного комплекса, выполненная на основе метода электроанalogии

На рис.2  $E$  - эквивалент напора, развиваемого НК,  $I$  - эквивалент расхода,  $R_c, R_{цн}, R_{вх}$  - соответственно, гидравлические сопротивления сети,

центробежного насоса, всасывающего трубопровода,  $C$  - элемент, отражающий упругие свойства жидкости и элементов конструкции насосного комплекса,  $L$  - элемент, отражающий инерционность потока жидкости [2, 3].

Используя приведенную выше модель, составим уравнение электрической цепи в соответствии со 2-м законом Кирхгофа (1):

$$E = I \left( R_c + R_{\text{цн}} + j\omega L + \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot R_{\text{ex}}}{\frac{1}{j\omega C} + R_{\text{ex}}} \right) \quad (1)$$

Соответствующая передаточная функция будет иметь вид (2):

$$W(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{1 + CR_{\text{ex}}p}{LCR_{\text{ex}}p^2 + (CR_{\text{ex}} \cdot (R_c + R_{\text{цн}}) + L)p + (R_c + R_{\text{цн}} + R_{\text{ex}})} \quad (2)$$

Характеристическое уравнение данной передаточной функции (3):

$$LCR_{\text{ex}}p^2 + (CR_{\text{ex}} \cdot (R_c + R_{\text{цн}}) + L)p + (R_c + R_{\text{цн}} + R_{\text{ex}}) = 0 \quad (3)$$

Необходимым условием устойчивости динамических процессов является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения, в частности его среднего коэффициента:

$$CR_{\text{ex}} \cdot (R_c + R_{\text{цн}}) + L > 0 \quad (4)$$

Учитывая, что  $H_{\text{цн}} = H_0 - aQ^2$ ,  $H_c = bQ^2$ , где  $H_{\text{цн}}$  - напор, развиваемый центробежным насосом,  $H_c$  - напор гидравлической сети, и принимая соответственно, что  $R_{\text{цн}} = \frac{dH}{dQ} = -2aQ$ ,  $R_c = \frac{dH}{dQ} = 2bQ$ , получим следующее неравенство (5)

$$a - b < \frac{L}{2QCR_{\text{ex}}} \quad (5)$$

В то же время  $a = \frac{H_0 - H_{\text{цн}}}{Q^2}$ ,  $b = \frac{H_c}{Q^2}$ , отсюда получим выражение (6)

$$H_{\text{цн}} + H_c > H_0 - \frac{L}{2CR_{\text{ex}}} \cdot Q \quad (6)$$

В рабочей точке (пересечении НРХ) напоры равны между собой:  
 $H_{\text{цн}} + H_c = 2H$ , тогда из (6) получим условие (7):

$$H > \frac{H_0}{2} - \frac{L}{4CR_{\text{ex}}} \cdot Q \quad (7)$$

Полученное условие позволяет построить границу устойчивости и выделить на НРХ области, соответствующие разной степени колебательности процессов в НК (рис. 3).

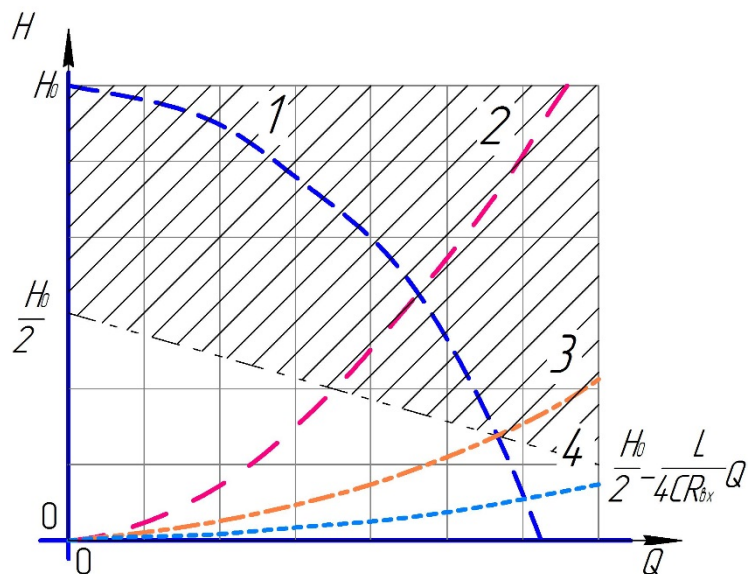
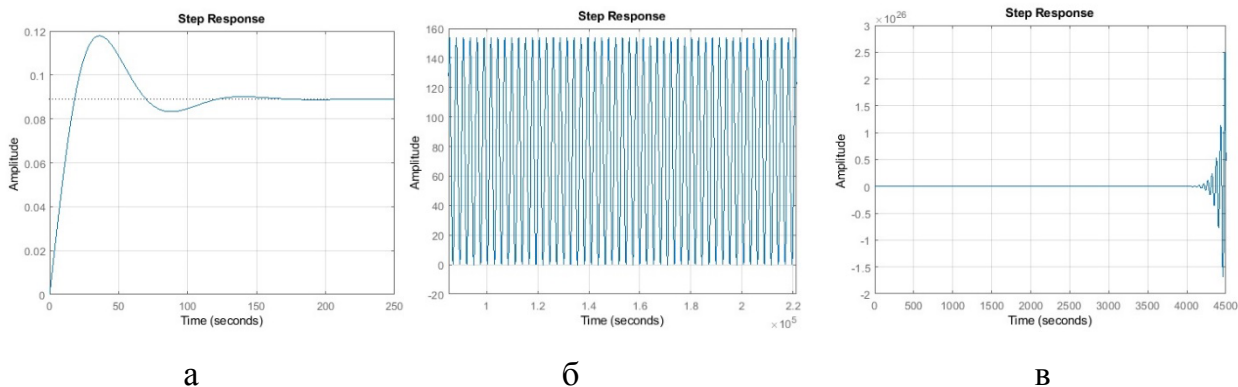


Рис. 3. Расположение рабочих точек при различных характеристиках сети:  
 1 – НРХ центробежного насоса; 2, 3, 4 – НРХ сети, рабочая точка которой находится соответственно в области устойчивости, на границе устойчивости, в области неустойчивости

Результаты численного моделирования в математическом пакете Matlab процессов в динамической системе по передаточной функции (2) для различного расположения рабочей точки НРХ представлены на рисунке 4:



*Рис. 4. Графики переходных процессов при различных условиях моделирования: а – первый эксперимент в области устойчивых процессов, б – второй эксперимент на границе устойчивости, в – третий эксперимент в области неустойчивых процессов*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование гидродинамических процессов, происходящих в насосном комплексе с помощью метода электроанalogии позволяет упростить сложные зависимости и наглядно представить основные закономерности.

Кроме положительного значения дифференциального сопротивления, описывающего изменение напорно-расходной характеристики гидравлической сети, имеет место отрицательное дифференциальное сопротивление напорно-расходной характеристики центробежного насоса. Наличие отрицательного и положительного значений данных сопротивлений в рабочей точке приводит к тому, что могут возникать динамические процессы различной степени колебательности, определяемой близостью к границе устойчивости, разделяющей соответствующие области.

Результаты исследования и определения условий возникновения и степени колебательности динамических процессов позволяют осуществлять построение соответствующих областей на напорно-расходной характеристике и обоснованный выбор рациональных режимов работы НК.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лютов А.Г., Новоженин М.Б. Методология автоматизированного контроля и управления режимами работы насосного комплекса в условиях возникновения кавитации. Мехатроника, автоматизация, управление. 2021;22(9):468-474. <https://doi.org/10.17587/mau.22.468-474>

2. Goppelt, F.; Hieninger, T.; Schmidt-Vollus, R.: Modeling Centrifugal Pump Systems from a System-Theoretical Point of View. In: *IEEE 18th Mechatronika 2018*. Brno, Tschechien, 05.-07. Dezember 2018.
3. R. Nollau, *Modellbildung und Simulation technischer Systeme*, Berlin Heidelberg: Springer, pp. 179 – 186, 2009.

*Артемьев С. Н., Крылов Д. Л., Муликов Д. С., Турченко И. С., Хлебников А. С.*  
АО «Аэроприбор-Восход»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ КЛЮЧАМИ ШВЕЙЦАРСКОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО СЕТЕВОГО ТОКА**

*Аннотация:* Швейцарский выпрямитель – это преобразователь трёхфазного переменного напряжения в постоянное. В сравнении с другими топологиями трёхфазных выпрямителей с корректорами коэффициента мощности понижает выходное напряжение и характеризуется низкими статическими и динамическими потерями на силовых транзисторных ключах. В рамках предлагаемой статьи приводятся результаты расчетов и математического моделирования электрических процессов различных вариантов управления транзисторными ключами схемы однонаправленного Швейцарского выпрямителя в режиме инвертора тока. Рассмотрены способы формирования обобщённого вектора тока 3-мя базовыми векторами. Получены диаграммы фазного тока и напряжения звена постоянного тока для разных способов модуляции. Представлены результаты исследования влияния алгоритмов модуляции транзисторных ключей ШВ на качество сетевого тока и на качество напряжения в звене постоянного тока.

*Ключевые слова:* швейцарский выпрямитель, корректор коэффициента мощности, широтно-импульсная модуляция, векторная широтно-импульсная модуляция, коэффициент гармоник.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в промышленности повсеместно используются вторичные трехфазные источники питания на базе полупроводниковых выпрямителей. Эти устройства при их несомненных преимуществах являются причиной появления высших гармоник тока в питающей сети, что оказывает негативное влияние не только на питающую сеть, но и на других потребителей, ухудшая качество питающей их электроэнергии.

Для удовлетворения требований по качеству потребляемого тока используются корректоры коэффициента мощности (ККМ). Одним из способов построения ККМ является применение схемы швейцарского выпрямителя (Swiss rectifier, далее - ШВ) [1, 2]. Схема ШВ представлена на рис. 1.

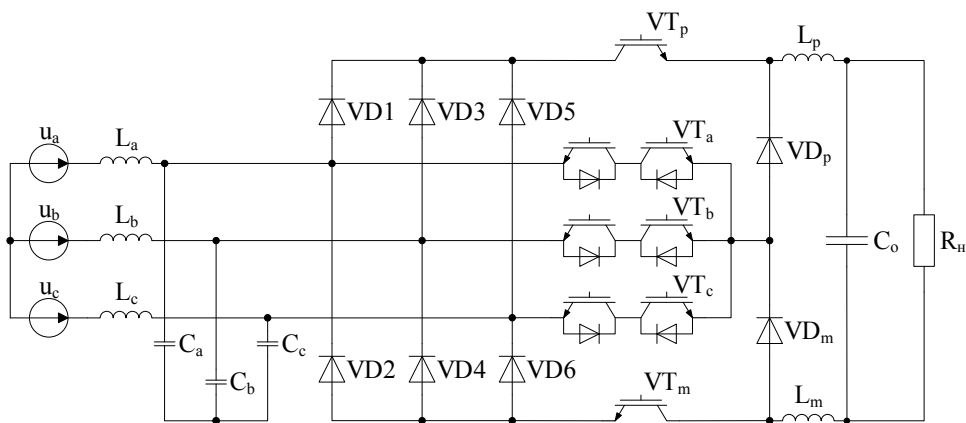


Рис. 1. Схема однонаправленного швейцарского выпрямителя

## 2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ И СПОСОБЫ МОДУЛЯЦИИ

### 2.1. Швейцарский выпрямитель в режиме инвертора тока

Различные вариации схемы ШВ находят широкое применение при построении устройств для систем распределения электропитания наземного транспорта, летательных аппаратов, а также наземных гражданских и промышленных объектов, в том числе питаемых от возобновляемых источников электроэнергии (солнечные и ветровые энергоустановки) [3, 4, 9]. Среди иностранных научно-технических публикаций представлено множество работ, посвященных принципам построения ККМ на базе ШВ, особенностям режимов управления и гибкости настроек алгоритмов работы ШВ, в том числе его модификаций [5 - 8].

Однако среди российских достижений в силовой преобразовательной техники для наземного транспорта, судовых и авиационных систем распределения электроэнергии опубликовано крайне мало работ по исследованию и применению изделий, спроектированных по принципу ШВ. В российской научно-технической литературе термин «Швейцарский выпрямитель» встречается относительно редко.

В данной статье представлен анализ влияния различных алгоритмов управления ШВ на входной ток и выходное напряжение. Для этого было



проведено исследование влияния алгоритмов модуляции транзисторных ключей ШВ на спектр сетевого тока и на спектр напряжения в звене постоянного тока.

Для исключения влияния паразитных параметров рассмотрим схему однонаправленного ШВ в режиме инвертора тока в рамках следующих допущений: все транзисторы заменятся идеальными ключами  $K_a, K_b, K_c, K_m, K_p$ , исключается трёхфазный LC-фильтр, выходной LC-фильтр с нагрузкой  $R_H$  заменяется на источник тока  $i_{dc}$  (рис. 2). Сетевой ток и напряжение звена постоянного тока при таких допущениях будут иметь прерывистый (импульсный) характер (рис. 3).

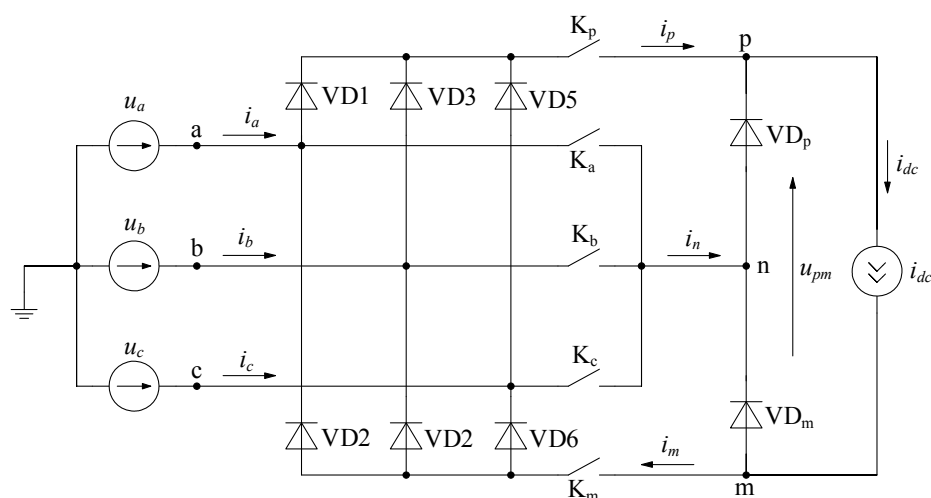


Рис. 2. Преобразованная схема ШВ

На схеме, представленной на рис.2, указаны положительные направления токов  $i_a, i_b, i_c, i_p, i_m, i_n$  и  $i_{dc}$ . Где  $i_a, i_b, i_c$  – фазные токи,  $i_p, i_m$  – токи ключей  $K_p$  и  $K_m$ ,  $i_n$  – ток одного из ключей  $K_a, K_b, K_c$ ,  $i_{dc}$  – ток источника постоянного тока.

В данной схеме входом для ШВ является источник постоянного тока  $i_{dc}$ , а выход у него нагружен на трёхфазную сеть с источниками напряжения  $u_a, u_b, u_c$ . Напряжения фаз изменяются по законам:

$$u_a = u_m \cdot \cos(\varphi)$$

$$u_b = u_m \cdot \cos(\varphi - 120^\circ)$$

$$u_c = u_m \cdot \cos(\varphi + 120^\circ)$$

где  $u_m$  – амплитуда фазных напряжений сети;

$\varphi$  – эл. градусы.

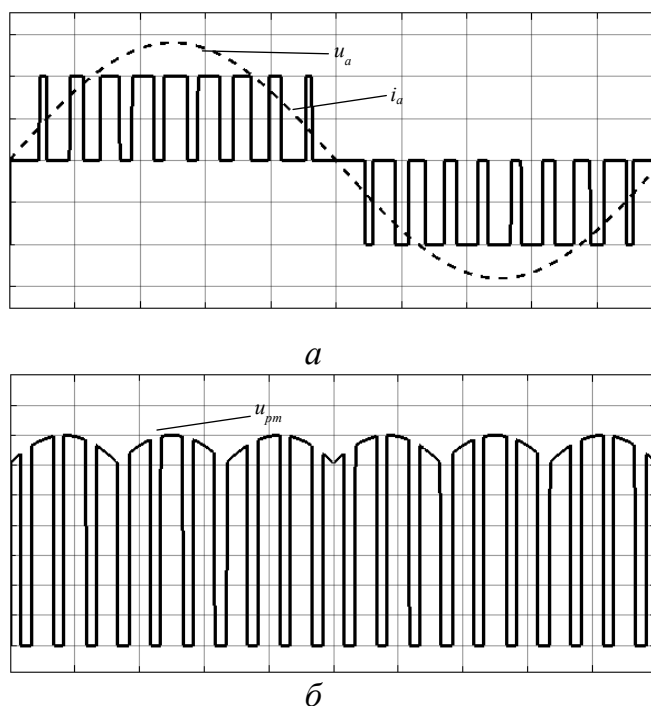


Рис. 3. Формы сетевого тока  $i_a$  (а) и напряжения  $u_{fm}$  (б) в звене постоянного тока при принятых допущениях

## 2.2. Алгоритмы работы ключей $K_a$ , $K_b$ , $K_c$

Ключи  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$  работают следующим образом:

- ключ  $K_a$  замкнут, если линейное напряжение  $u_{bc}$  (или  $u_{cb}$ ) больше остальных линейных напряжений, в противном случае – разомкнут;
- ключ  $K_b$  замкнут, если линейное напряжение  $u_{ac}$  (или  $u_{ca}$ ) больше остальных линейных напряжений, в противном случае – разомкнут;
- ключ  $K_c$  замкнут, если линейное напряжение  $u_{ab}$  (или  $u_{ba}$ ) больше остальных линейных напряжений, в противном случае – разомкнут.

На рис. 4 показаны диаграммы одного периода фазных и линейных напряжений входной симметричной сети. Период разделён на 12 секторов, каждый сектор равен 30 эл. градусам.

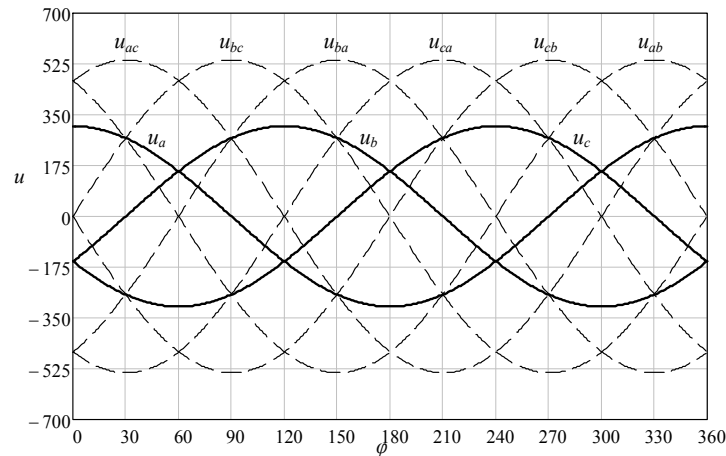


Рис. 4. Диаграммы фазных и линейных напряжений сети

Исходя из алгоритма работы ключей  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$ , можно составить таблицу (табл. 1) переключения этих ключей. «0» означает, что ключ разомкнут, «1» – ключ замкнут.

Таблица 1

Состояния ключей  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$

Сектора		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Состояния ключей	$K_a$	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
	$K_b$	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	$K_c$	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1

Подробнее рассмотрим 1-й сектор. Из таблицы 1 видно, что в «секторе 1» включен только ключ  $K_b$ . Коммутироваться с высокой частотой будут ключи  $K_p$  и  $K_m$ .

### 2.3. Алгоритм работы ключей $K_p$ , $K_m$

Кол-во возможных комбинаций состояний ключей  $K_p$  и  $K_m$  равно четырём, они представлены в таблице 2 ниже. Так же, комбинацию состояний ключей можно обозначить термином «базовый вектор». Этим векторам соответствуют контуры протекания тока, приведённые на рис. 5. С помощью базовых векторов можно сформировать обобщённый вектор сетевого тока  $\overline{i_{in}}$ .

Базовые векторы

Базовый вектор	0	1	2	3
Состояния ключа $K_p$	0	0	1	1
Состояния ключа $K_m$	0	1	0	1

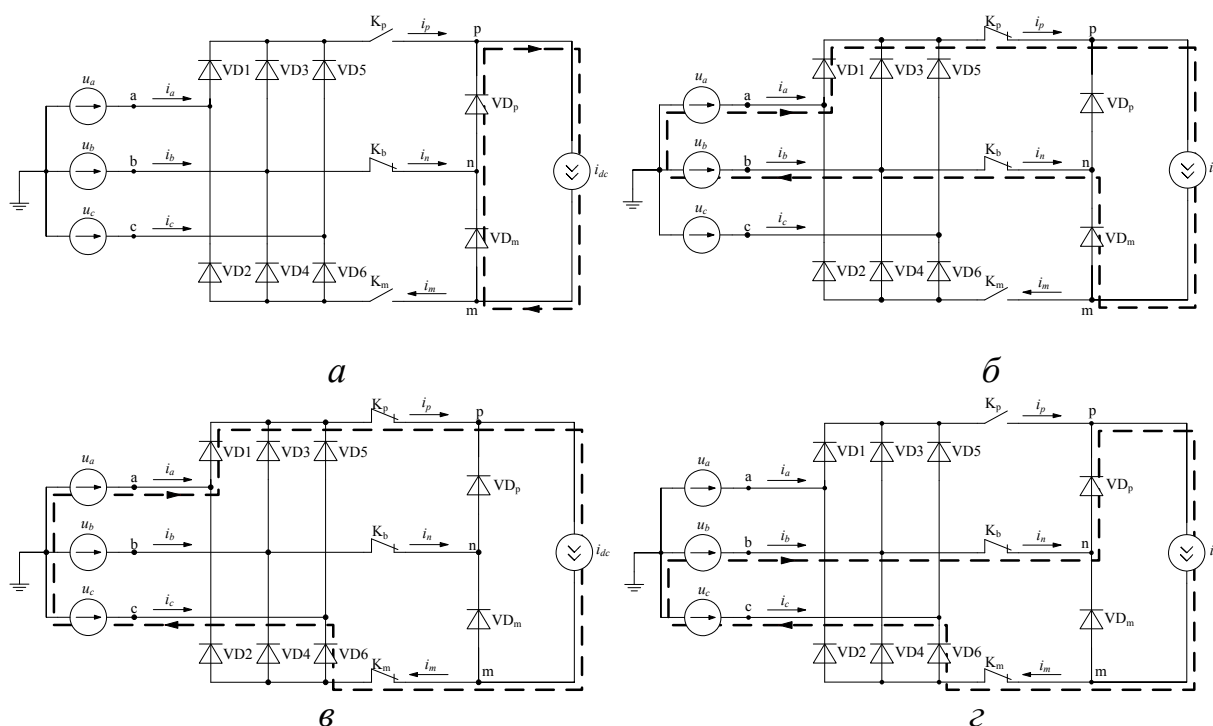


Рис. 5. Контуры протекания тока в «секторе 1» для базовых векторов:

а)  $\vec{i}_0$ , б)  $\vec{i}_1$ , в)  $\vec{i}_2$ , г)  $\vec{i}_3$ 

Исходя из рис. 5 составим таблицу 3 направлений токов через фазы и ключи ШВ. Знак «+» означает положительное направление тока, знак «-» – отрицательное, «0» – отсутствие протекания тока. В последней строке таблицы указано какому линейному напряжению равно напряжение  $u_{pm}$ .

Для формирования обобщённого вектора тока  $\vec{i}_{in}$  на периоде ШИМ  $T_{sw}$  можно использовать как все 4 базовых вектора так и ограничиться 3-мя. Из 2-х и менее базовых векторов в принципе невозможно сформировать обобщённый вектор сетевого тока  $\vec{i}_{in}$  таким, чтобы фазные токи были синусоидальными. Наибольший интерес представляют способы формирования обобщённого вектора тока только 3-мя базовыми векторами. Рассмотрим два таких способа.

1-й способ – в комбинации базовых векторов всегда используются 0-й и 3-й базовые векторы, а 1-й и 2-й меняются между собой в зависимости от сектора. В 1-м секторе используется комбинация векторов 0-2-3. Комбинация 0-1-3 не рассматривается, т.к. ток  $i_b$  в 1-м секторе должен быть отрицательным, а при векторе  $\overline{i_1}$  тока  $i_b$  имеет положительное направление. Во 2-м секторе наоборот – используется комбинация 0-1-3, а 0-2-3 не используется. Таким образом выходит, что при таком способе модуляции фазные токи не меняют своего направления (см. табл. 3). 2-й способ – в комбинации базовых векторов всегда используются 1-й, 2-й, 3-й базовые векторы. На рис. 6 показано формирование обобщенного вектора тока с помощью 1-го способа модуляции.

Таблица 3

Базовый вектор		Направления токов			
		0	1	2	3
Состояния ключей	$K_p$	0	0	1	1
	$K_m$	0	1	0	1
Направления токов	$i_a$	0	0	+	+
	$i_b$	0	+	-	0
	$i_c$	0	-	0	-
	$i_n$	0	+	-	0
Значение напряжения	$u_{pm}$	0	$u_{bc}$	$u_{ab}$	$u_{ac}$

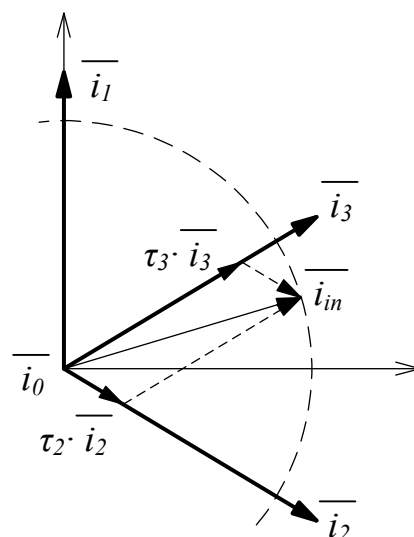


Рис. 6. Векторная диаграмма токов

Т.е. вектор  $\overline{i_{in}}$  будет равен:

$$\overline{i_{in}} = \tau_2 \cdot \overline{i_2} + \tau_3 \cdot \overline{i_3} + \tau_0 \cdot \overline{i_0}$$

где  $\tau_2, \tau_3, \tau_0$  – относительное время включения соответствующего базового вектора на периоде ШИМ.

Сумма относительных времён включения базовых векторов на периоде ШИМ будет равна:

$$\tau_2 + \tau_3 + \tau_0 = 1$$

По аналогии получим формулы для 2-го способа модуляции:

$$\overline{i_{in}} = \tau_1 \cdot \overline{i_1} + \tau_2 \cdot \overline{i_2} + \tau_3 \cdot \overline{i_3}$$

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 1$$

Формирование импульсов управления ключами  $K_p$  и  $K_m$  на периоде ШИМ ( $T_{sw}$ ) показано для обоих способов модуляции на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что для 1-го способа модуляции несущий сигнал для ключей  $K_p$  и  $K_m$  будет один и тот же, а для 2-го способа – несущий сигнал для ключа  $K_m$  смещён на  $180^\circ$  относительно несущего сигнала для ключа  $K_p$ .

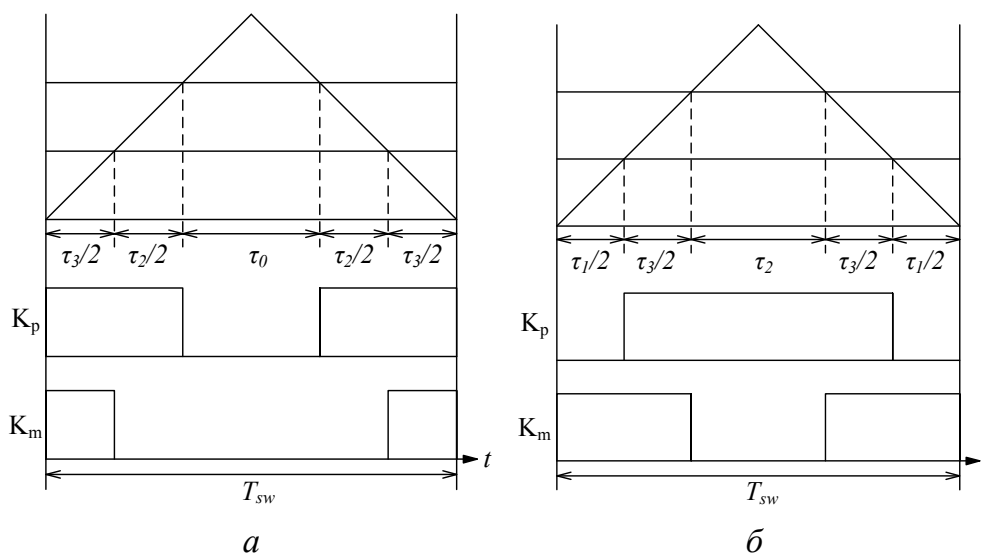


Рис. 7. Формирование импульсов управления ключами  $K_p$  и  $K_m$ :  
а) 1-й способ модуляции; б) 2-й способ модуляции

Далее более детально рассмотрены оба способа модуляции.

#### 2.4. 1-й способ модуляции

Из таблицы направлений токов можно определить, что ток  $i_b$  формируется вектором  $\overline{i_2}$ , ток  $i_c$  – вектором  $\overline{i_3}$ , ток  $i_a$  – суммой векторов  $\overline{i_2}$  и  $\overline{i_3}$ .

Значит средние значения фазных токов и напряжения  $u_{pn}$  на периоде ШИМ будут равны:

$$i_a = -i_b - i_c = i_{dc} \cdot (\tau_2 + \tau_3) = (1 - \tau_0) \cdot i_{dc}$$

$$i_b = -\tau_2 \cdot i_{dc}$$

$$i_c = -\tau_3 \cdot i_{dc}$$

$$i_n = -\tau_2 \cdot i_{dc}$$

$$u_{pn} = \tau_2 \cdot u_{ab} + \tau_3 \cdot u_{ac}$$

Относительные времена включения базовых векторов вычисляются следующим образом:

$$\tau_2 = -m \cdot \cos(\varphi - 120^\circ)$$

$$\tau_3 = -m \cdot \cos(\varphi + 120^\circ)$$

где  $m$  – глубина модуляции (изменяется от 0 до 1);

$\varphi$  – эл. градусы (изменяется от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ ).

Т.к. сумма относительных времён включения равна 1, то время включения базового вектора  $\overline{i_0}$  будет равно:

$$\tau_0 = 1 - \tau_2 - \tau_3$$

Относительные времена включения ключей  $K_p$  и  $K_m$  вычисляются следующим образом:

$$\tau_p = \tau_2 + \tau_3 = 1 - \tau_0 = m \cdot \cos(\varphi)$$

$$\tau_m = \tau_3 = -m \cdot \cos(\varphi + 120^\circ)$$

Диаграммы относительных времён включения базовых векторов и ключей  $K_p$  и  $K_m$  в секторе 1 для глубины модуляции равной 1 приведены на рис. 8.

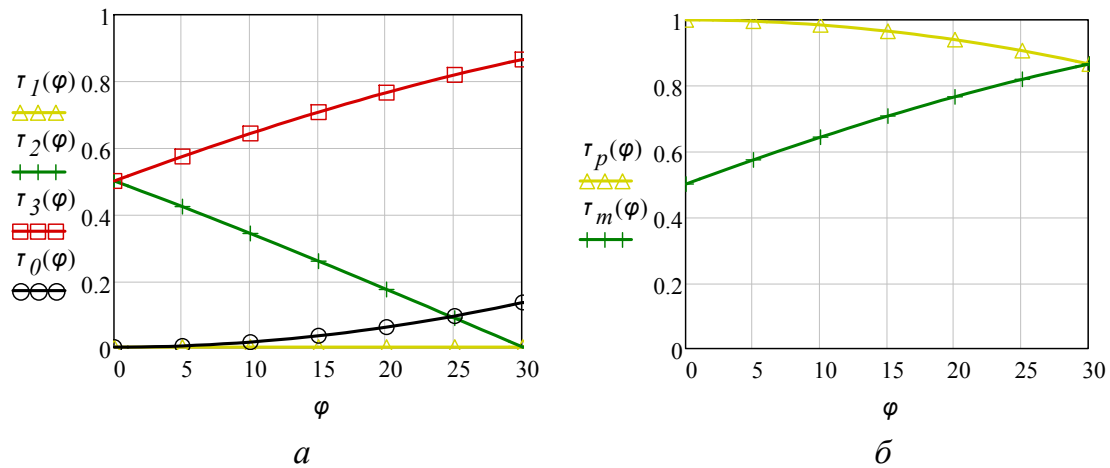


Рис. 8. Диаграммы относительных времён включения:  
а) базовых векторов; б) ключей  $K_p$  и  $K_m$

Подставив формулы относительных времён включения базовых векторов в формулы токов в секторе 1, получим:

$$i_a = i_{dc} \cdot m \cdot \cos \varphi$$

$$i_b = i_{dc} \cdot m \cdot \cos(\varphi - 120^\circ)$$

$$i_c = i_{dc} \cdot m \cdot \cos(\varphi + 120^\circ)$$

$$i_n = i_{dc} \cdot m \cdot \cos(\varphi - 120^\circ)$$

Из этих формул видно, что 1-я гармоника токов  $i_a, i_b, i_c$  совпадает по фазе с 1-й гармоникой соответствующего фазного напряжения.

Среднее значение напряжения  $u_{pm}$  в секторе 1 будет равно:

$$u_{pm} = \tau_2 \cdot u_{ab} + \tau_3 \cdot u_{ac}$$

После преобразований получим, что среднее значение напряжения  $u_{pm}$  будет постоянным:

$$u_{pm} = \frac{3}{2} \cdot m \cdot u_m$$

Диаграммы токов  $i_a, i_b, i_c, i_n$  и напряжения  $u_{pm}$  в секторе 1 приведены на рис. 9.



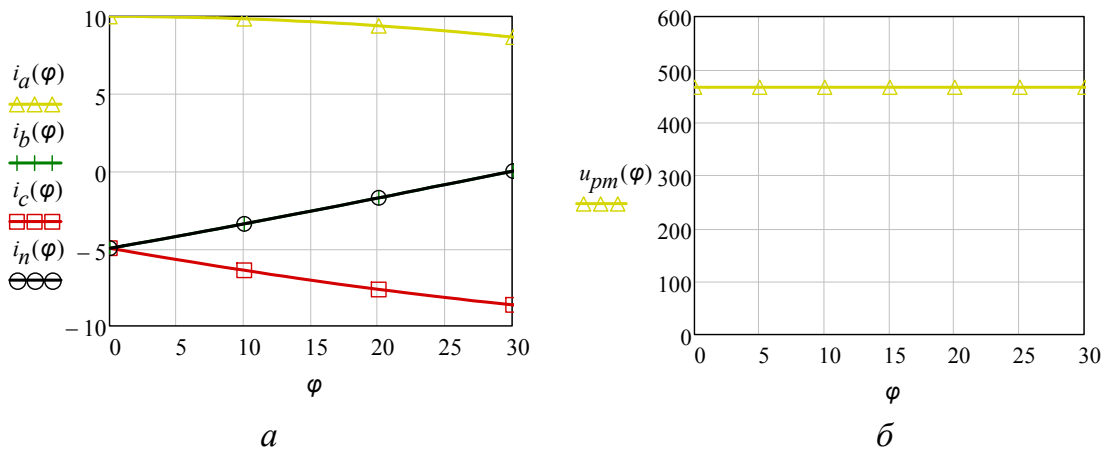


Рис. 9. Диаграммы токов  $i_a, i_b, i_c, i_n$  (а) и напряжения  $u_{pm}$  (б)

Получив формулы относительных времён включения базовых векторов  $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ , относительных времён включения  $\tau_p, \tau_m$ , токов  $i_a, i_b, i_c, i_n$ , напряжения  $u_{pm}$  для остальных секторов, можно построить их диаграммы (рис. 10).

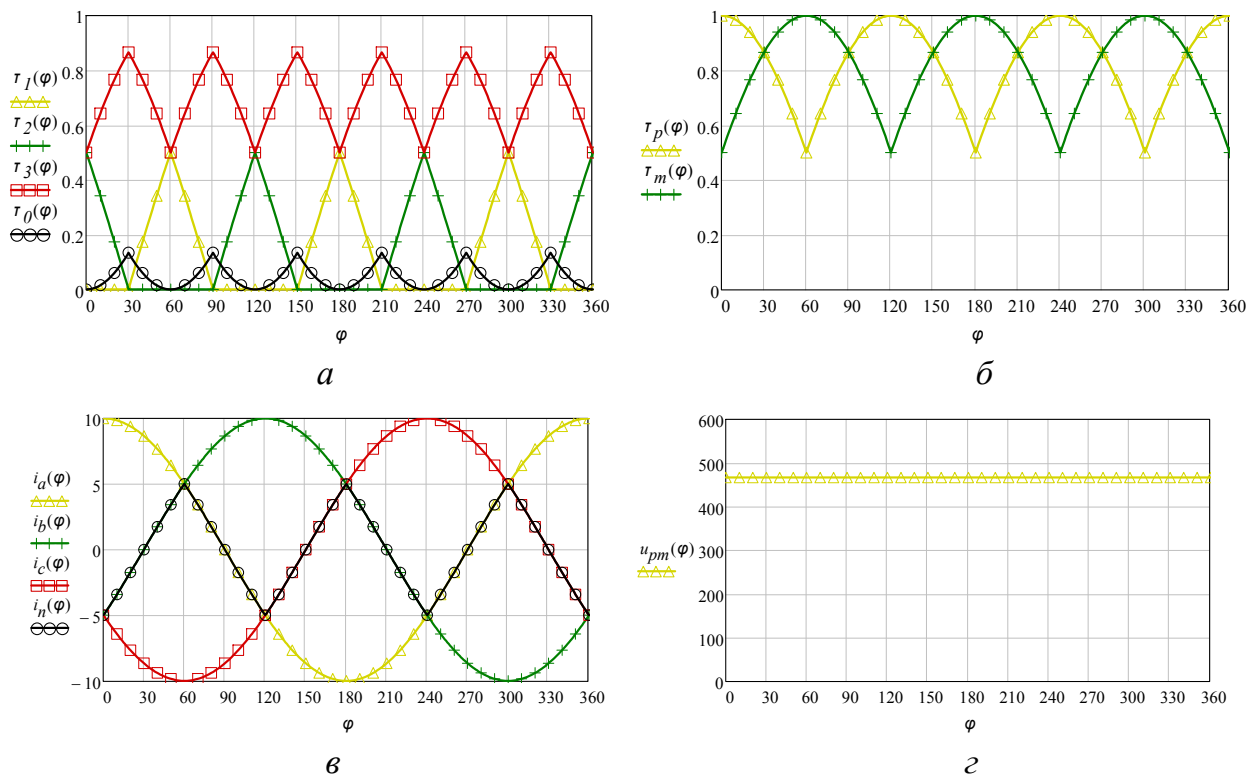


Рис. 10. Диаграммы относительных времён включения базовых векторов  $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3$  (а), относительных времён включения  $\tau_p, \tau_m$  (б), токов  $i_a, i_b, i_c, i_n$  (в), напряжения  $u_{pm}$  (г) для всех 12 секторов

## 2.5. 2-й способ модуляции

Для 2-го способа модуляции диаграммы относительных времён включения  $\tau_p, \tau_m$ , токов  $i_{u1}, i_{u2}, i_{u3}, i_{u4}$ , напряжения  $u_{pm}$  будут такие же как и для 1-го способа модуляции. Относительное время  $\tau_0$  всегда равно 0. Диаграммы относительных времён включения  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  приведены на рис. 11.

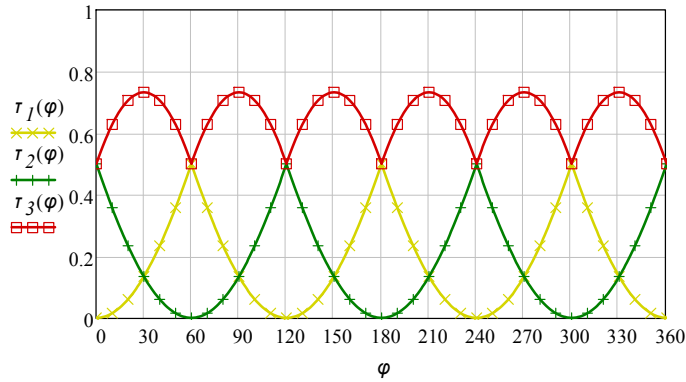


Рис. 11. Диаграммы относительных времён включения базовых векторов  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки влияния алгоритмов модуляции на качество потребляемого тока было проведено математическое моделирование, результаты которого представлены ниже. Значение тока источника постоянного тока равно 10 А, амплитуда фазных напряжений равна 311 В, частота фазных напряжений равна 50 Гц.

Диаграммы фазного тока  $i_a$  при глубине модуляции  $m = 1$ , для разных способов модуляции представлены на рис. 12.

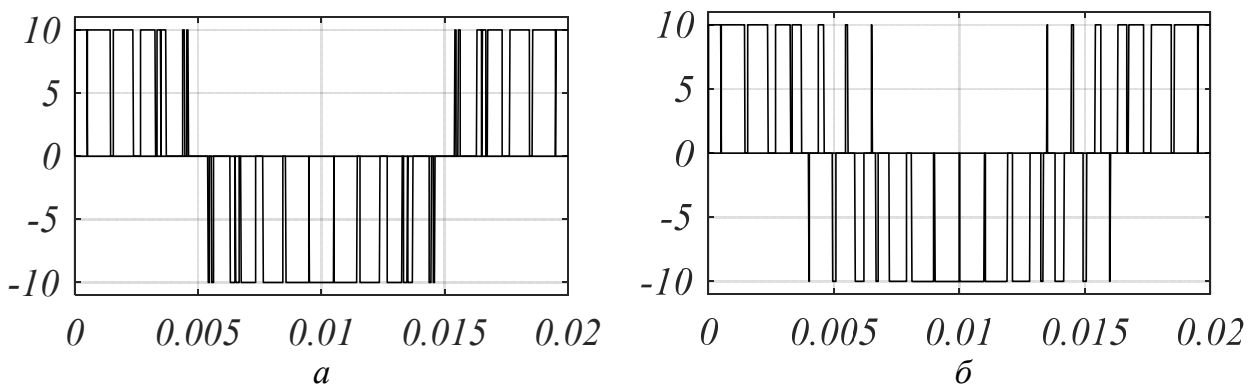


Рис. 12. Диаграммы тока  $i_a$  для разных способов модуляции ( $m = 1,0$ ):  
а) 1-й способ, б) 2-й способ

В таблице 4 приведены значения амплитуды 1-й гармоники тока  $i_{m1}$  и коэффициента гармоник  $K_2$  для двух способов модуляции при разной глубине модуляции  $m$ .

Таблица 4

Значения  $i_{m1}$  и  $K_2$

$m$ , о.е.	1-й вариант модуляции		2-й вариант модуляции	
	$i_{m1}$ , А	$K_2$ , %	$i_{m1}$ , А	$K_2$ , %
1	9,889	53,58	9,896	60,15
0,8	7,993	76,99	7,997	104,18
0,6	5,994	106,03	5,997	162,08
0,4	3,992	147,94	3,993	212,75
0,2	1,988	232,29	1,989	318,00

Из таблицы 4 видно, что при использовании 1-го способа модуляции коэффициент гармоник сетевого тока меньше чем при использовании 2-го способа.

Диаграммы напряжения  $u_{pm}$  звена постоянного тока при глубине модуляции  $m = 1$ , для разных способов модуляции представлены на рис. 13.

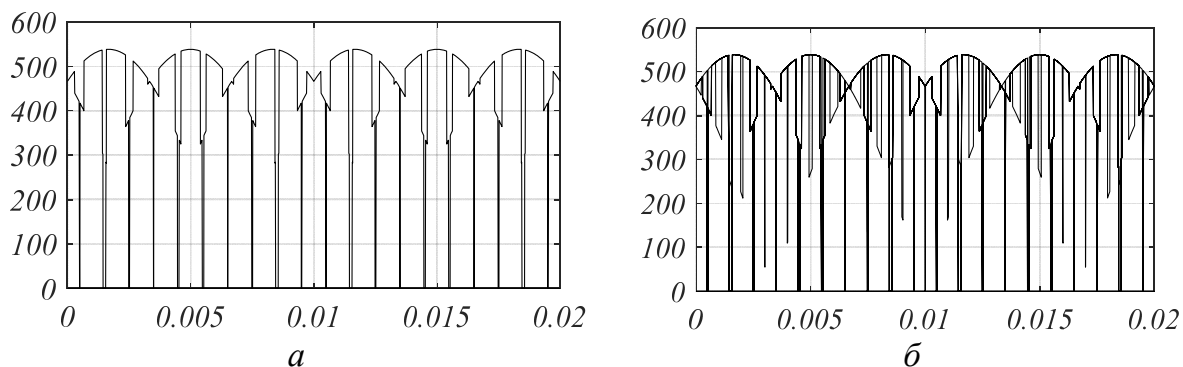


Рис. 13. Диаграммы напряжения  $u_{pm}$  звена постоянного тока для разных способов модуляции ( $m = 1,0$ ):  
а) 1-й способ, б) 2-й способ

В таблице 5 приведены значения постоянной составляющей напряжения  $u_{pm0}$  и коэффициента искажений  $K_u$  для двух способов модуляции при разной глубине модуляции  $m$ . Коэффициент искажений рассчитан по следующей формуле:

$$K_u = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}}{U_0}$$

где  $U_1$  – среднеквадратичное значение 1-й гармоники (50 Гц) в спектре напряжения  $u_{pm0}$ ;  $U_0$  – значения постоянной составляющей в спектре напряжения  $u_{pm0}$ .

Таблица 5

Значения  $u_{pm}$  и  $K_u$

$m$ , о.е.	1-й способ модуляции		2-й способ модуляции	
	$u_{pm0}$ , В	$K_u$ , %	$u_{pm0}$ , В	$K_u$ , %
1	461,9	37,85	461,8	28,37
0,8	373,3	80,85	373,2	55,95
0,6	279,8	123,98	279,9	70,58
0,4	186,5	181,78	186,6	129,45
0,2	93,25	293,51	93,27	231,41

Из таблицы 5 видно, что при использовании 2-го способа модуляции коэффициент искажений напряжения звена постоянного тока меньше чем при использовании 1-го способа.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи были проанализированы результаты расчетов и математического моделирования электрических процессов различных вариантов управления транзисторными ключами схемы однонаправленного Швейцарского выпрямителя в режиме инвертора тока. Рассмотрены способы формирования обобщенного вектора тока 3-мя базовыми векторами. Получены диаграммы фазного тока  $i_a$  и напряжения  $u_{pm}$  звена постоянного тока для разных способов модуляции.

Результаты моделирования сведены в таблицы, при сравнительном анализе которых выяснено, что применение модуляции с комбинацией 0-1(2)-3 базовых векторов (1-й способ) характеризуется меньшим коэффициентом гармоник сетевого тока, что снижает требования к входному сглаживающему фильтру. Применение модуляции с комбинацией 1-2-3 базовых векторов (2-й способ) характеризуется меньшим коэффициентом искажений напряжения

звена постоянного тока, что снижает требования к сглаживающему фильтру  
звена постоянного тока.

Каждый из проанализированных способов модуляции целесообразно  
выбирать, исходя из требований, предъявляющихся к конкретному изделию, в  
составе которого применена схема Швейцарского выпрямителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Soeiro, T. Friedli, and J.W. Kolar, “Swiss rectifier – A novel three-phase buck-type PFC topology for electric vehicle battery charging,” // in Proceedings of the 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012, pp. 2617–2624.
2. M. F. Vancu, T. Soeiro, J. Muhlethaler, J.W. Kolar, and D. Aggeler, “Comparative evaluation of bidirectional buck-type PFC converter systems for interfacing residential DC distribution systems to the smart grid,” // in Proceedings 38th Annual Conference IEEE Ind. Electron. Soc., Oct. 2012, pp. 5153–5160.
3. D. Marquet, T. Tanaka, K. Murai, T. Toru, and T. Babasaki, “DC power wide spread in telecom/datacenter and in home/office with renewable energy and energy autonomy,” // in Proceedings 35th Int. Telecommun. Energy Conf., Oct. 2013, pp. 1–6.
4. M. Silva, N. Hensgens, J. Molina, M. Vasic, J. Oliver, P. Alou, O. Garcia, and J. Cobos, “Interleaved multi-cell isolated three-phase pwm rectifier system for aircraft applications,” // in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, 2013, pp. 1035-1041.
5. P. Cortes, M. F. Vancu and J. W. Kolar, “Swiss Rectifier Output Voltage Control with Inner Loop Power Flow Programming (PFP),” // in Proceedings of the 14th IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2013, pp. 1–8.
6. R. Chen, Y. Yao, L. Zhao, and M. Xu, “Inhibiting mains current distortion for SWISS rectifier—A three-phase buck-type harmonic current injection PFC converter,” // in Proceedings IEEE Appl. Power Electron. Conference Expo., Mar. 2015, pp. 1850–1854.
7. L. Schrittwieser, M. F. Vancu, J.W. Kolar, and T. B. Soeiro, “Control of the input characteristic and the displacement factor of uni- and bidirectional SWISS rectifier for symmetrical and unsymmetrical three-phase mains,” // in Proceedings 9th Int. Conference Power Electron. ECCE Asia, Jun. 2015, pp. 40–47.
8. B. Guo, F. Wang, and E. Aeloiza, “A novel three-phase current source rectifier with delta-type input connection to reduce the device conduction loss,” // IEEE Trans. Power Electron., Feb. 2016, vol. 31, no. 2, pp. 1074–1084.
9. L. Schrittwieser, J. W. Kolar and T. B. Soeiro, “Novel SWISS Rectifier Modulation Scheme Preventing Input Current Distortions at Sector Boundaries” // IEEE Trans. Power Electron., July 2017, vol. 32, no. 7, pp. 5771 – 5785.

## ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КАК ВХОДНОЕ ЗВЕНО ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

**Аннотация:** В статье обосновывается важность применения трансформаторно-выпрямительных устройств для ряда промышленных потребителей электроэнергии. Приводятся преимущества и недостатки увеличения фазности трансформаторно-выпрямительных устройств. Оценено влияние амплитуд пульсаций на потери устройства. Приведено сравнение форм кривых при наличии уравнивающего реактора в конструкции и при его отсутствии.

**Ключевые слова:** трансформаторно-выпрямительное устройство, преобразователь числа фаз, уравнивающий реактор.

Значительное количество потребителей электроэнергии так или иначе требуют её преобразования. Часто промежуточным пунктом в цепи преобразований является постоянный ток, который в дальнейшем инвертируется до необходимых значений по амплитуде и частоте [1]. Ярким примером применения такой схемы преобразования являются источники питания (ИП) электротехнологических установок [2]. Упрощенная схема такого ИП приведена на рисунке 1.

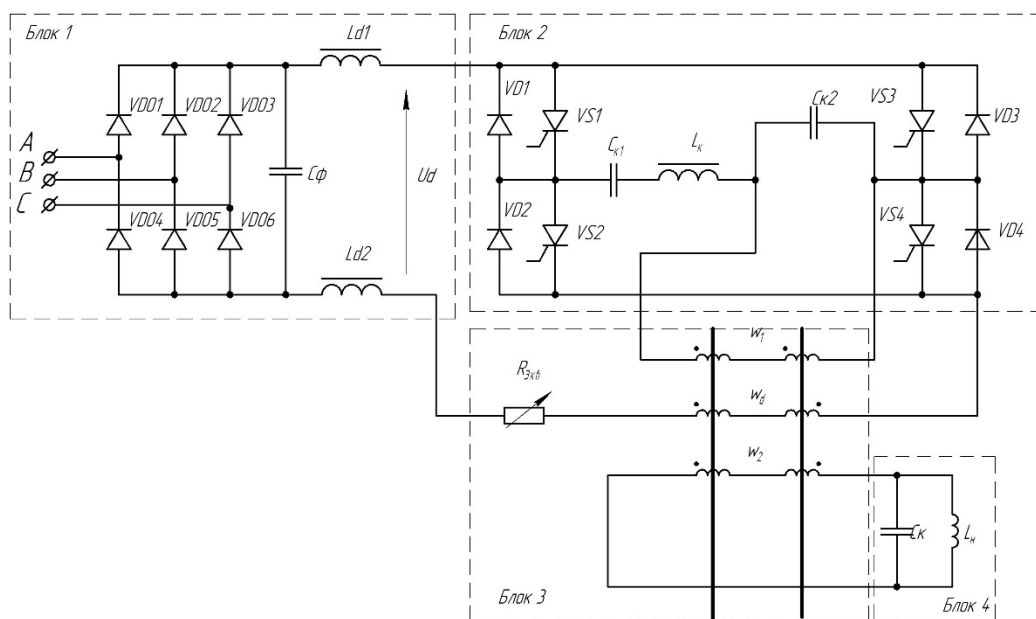


Рис. 1. Схема источника питания с ферромагнитным модулем

Однако, не всегда на практике напряжение, непосредственно выпрямленное из сетевого, может быть использовано для инвертирования. Часто на вход инвертора требуется подавать напряжение по величине выше или ниже того, которое возможно получить путем выпрямления сетевого напряжения. Для преобразования постоянного напряжения до требуемой величины применяются входные многообмоточные трансформаторы. Но преимущество их применения не только в преобразовании величины выходного напряжения. Нередко входной выпрямительный трансформатор – это ещё и преобразователь числа фаз. Увеличение количества выходных фаз ведет к следующим изменениям в характеристиках трансформаторно-выпрямительных устройств:

1. Снижение коэффициента пульсаций. Данный коэффициент непосредственно зависит от числа фаз выпрямителя и определяется выражением:

$$q = \frac{1}{m^2 - 1}, \quad (1)$$

где  $m$  - число фаз выпрямителя.

Согласно (1) для  $m$ -фазных систем получаем коэффициенты пульсаций, сведенные в таблицу 1

Таблица 1

Коэффициенты пульсаций  $m$ -фазных схем выпрямления

$m$	3	6	12
$q$	0,25	0,057	0,014

2. Уменьшение абсолютного коэффициента пульсаций. Данный коэффициент показывает на сколько велика амплитуда пульсаций по отношению к среднему выпрямленному напряжению. Коэффициент определяется выражением:

$$k_{II} = \frac{\Delta U_d}{U_d},$$

где  $\Delta U_d$  – амплитуда пульсаций,  $U_d = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}$  – среднее выпрямленное

напряжение,  $U_2$  – фазное напряжение вторичных обмоток трансформатора.

3. Увеличение частоты пульсаций. Пульсации с высокой частотой также могут негативно сказываться на работе электрооборудования. И если частота основной гармонической составляющей равна:

$$f = mf_c, \quad (2)$$

где  $f_c$  – частота сетевого напряжения,

то частота  $\nu$ -ой гармоники будет в  $\nu$  раз превышать частоту основной гармоники, определенной по (2). Здесь же стоит учитывать, что токи некоторых гармоник могут замыкаться внутри выпрямительных мостов, соединенных параллельно. К их числу, например, можно отнести токи 6-ой гармонической составляющей в 12-пульсном трансформаторно-выпрямительном устройстве. Однако, с увеличением количества выходных фаз выпрямительного трансформатора до 9 наблюдается снижение доли нечетных гармоник, при чем среди всех нечетных, кроме основной, превышают долю в 1% только 17-ая и 19-ая гармонические составляющие [3]. При этом токи 1-ой гармоники замкнуты накоротко.

Другим важным аспектом в конструкции ТВУ помимо увеличения фазности является применение уравнивающего реактора. Так, например, при испытаниях спроектированного на кафедре электромеханики ФГБОУ ВО УГАТУ 12-пульсного ТВУ наблюдается значительное искажение кривых фазных напряжений при отсутствии уравнивающего реактора (рис. 2). Как видно на рисунке разность амплитуд с максимальным и минимальным размахом составляет порядка 300мВ, что равняется 27% от средневыпрямленного значения.



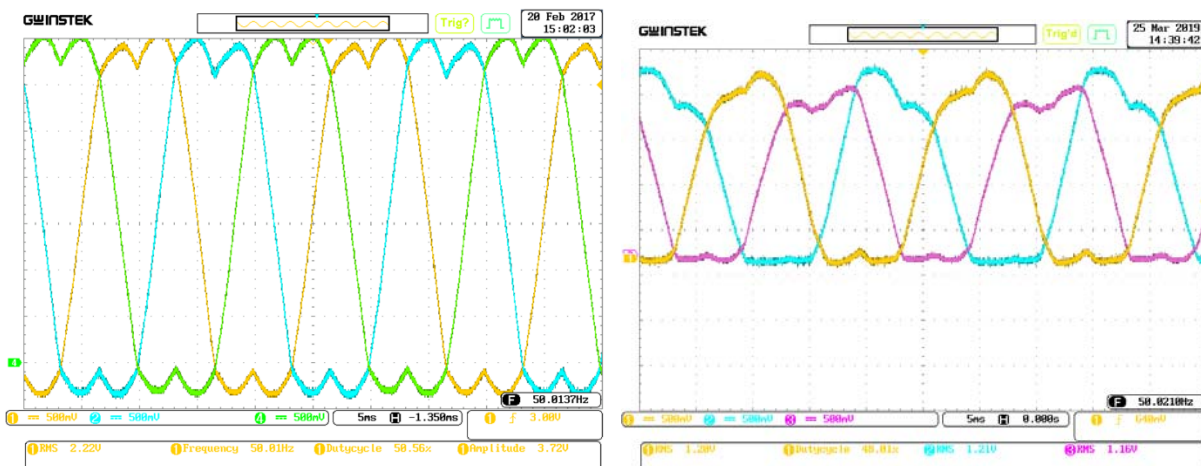


Рис. 2. График системы фазных напряжений на выходе выпрямительного трансформатора при наличии уравнивающего реактора (слева) и без него (справа)

Известно, что, интегрируя произведение амплитуды пульсаций на величину амплитуды пульсаций тока, можно получить значение мощности на выходе выпрямителя. Мощность с учетом «пульсирующей» составляющей при этом за период  $T$  составит:

$$P_d' = \frac{1}{T} \int_0^T u_d i_d dt,$$

или в виде:

$$P_d' = U_d I_d + \frac{1}{T} \int_0^T \Delta u_d \Delta i_d dt,$$

где  $\Delta u_d$  и  $\Delta i_d$  – «пульсирующие» составляющие постоянного напряжения и тока;  $I_d$  и  $U_d$  – выпрямленные средние значения тока и напряжения на выходе выпрямителя;

Таким образом, при проектировании ТВУ, необходимо учитывать не только ключевые коэффициенты, связанные с характеристикой величины пульсаций и частотой пульсации гармонических и субгармонических составляющих, но и наличие конструктивных элементов системы, позволяющих повысить качество питающего напряжения при сохранении мощности в нагрузке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992г. 296с.
2. Бар В.И. Электротехнические установки и их источники питания: Учебное пособие для вузов по спец. «Промышленная электроника» Тольятти: ТГУ, 2002.
3. F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, Z. I. Yalalova, D. V. Gusakov and R. D. Karimov Reduction of idling losses of eighteen-pulse transformer rectifier unit for aerospace application Published under license by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 87, Issue 3 Citation F R Ismagilov et al 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 87 032012

*Рогинская Л. Э., Горбунов А. С., Меднов А. А.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

### **ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МАГНИТОПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМ С СЕТЬЮ**

*Аннотация:* В статье заостряется внимание на проблему электромагнитной совместимости магнитополупроводниковых систем с сетью. Приводятся негативные факторы взаимовлияния сети и полупроводниковых преобразователей друг на друга. Также в статье упомянуты способы снижения влияния гармонических и субгармонических составляющих на форму кривой сетевого напряжения, а также приведена разработка, позволяющая снизить величину негативного влияния до минимальных значений.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, трансформаторный преобразователь, выпрямительное устройство.

Как известно, некоторые воздействия в природе вызывают процесс противодействия: явление самоиндукции, проявляющееся в катушке индуктивности при изменении магнитного поля; третий закон Ньютона, олицетворяющий равенство физического воздействия двух взаимодействующих сил и др. При работе полупроводниковых приборов наблюдается их влияние на питающую сеть при переходе из одного установившегося (замкнутого) состояния в другое (разомкнутое) и обратно при изменении фаз питающего напряжения, непосредственно связанное с тем, что система стремится сохранить свое установившееся состояние [0]. Так на представленном на рисунке 3 графике напряжения в цепи питания выпрямительного устройства наблюдаются провалы напряжения, вызванные коммутацией полупроводниковых выпрямителей. И если считать, что сеть представлена источником синусоидальной электродвижущей силы  $e$ , а все проводники между источником и потребителем образуют индуктивность сети

$L_c$ , то напряжение на входе преобразователя можно представить выражением [0]:

$$u = e - \Delta u_x \frac{L_c}{L_c + L_k} = e - L_c \frac{di}{dt},$$

где  $\Delta u_x$  – коммутационное падение напряжения,  $L_k$  – приведенная индуктивность рассеивания входного выпрямительного трансформатора.

Таким образом в сеть генерируются помехи, искажается синусоидальная форма питающего напряжения. Переходные режимы между установившимися состояниями в цепи с частотой, кратной частоте коммутации выпрямителей ведут к появлению как гармонических, так и субгармонических составляющих в цепях с нелинейными элементами. Совокупное влияние гармонических составляющих проявляется в повышенных потерях на активном сопротивлении в электрической цепи, на искажении качества информационного или слаботочного сигнала, а также может привести к значительному ухудшению параметров электромагнитной совместимости с окружающим электрооборудованием и параметров качества электроэнергии, нормируемых рядом стандартов [0–0].

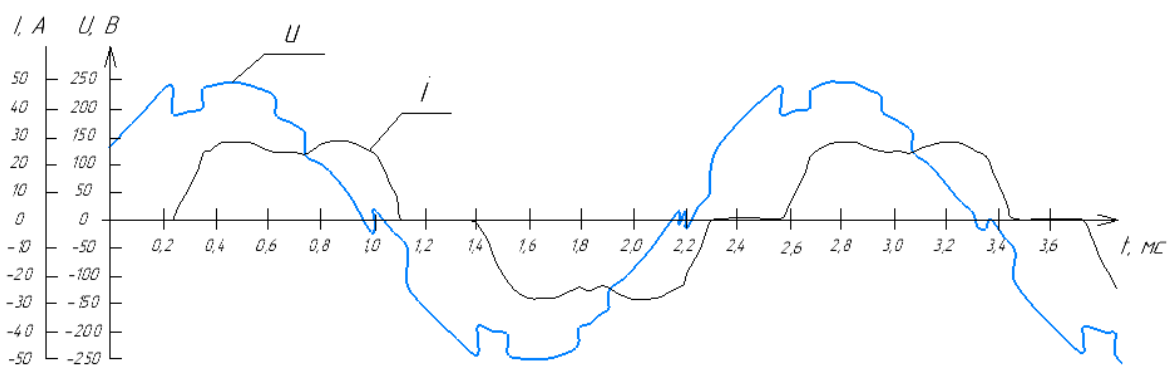


Рис. 3. Кривая напряжения питания при работающем выпрямительном устройстве

В составе большинства источников питания ЭТУИН используются реактивные элементы, предназначенные для управления режимом реактивной мощности сети. Реактивные мощности этих элементов при этом непосредственно зависят от величины напряжения и его частоты:

$$Q_c = \omega CU^2; Q_L = \frac{U^2}{\omega L}, \quad (1)$$

где  $Q_c, Q_L$  – реактивные мощности емкостного и индуктивного накопительного элементов,  $\omega$  – угловая частота сети,  $C$  – емкость,  $U$  – напряжение сети,  $L$  – индуктивность.

Из (1) следует, что значения реактивной мощности у индуктивности и емкости значительно коррелируют с отклонением напряжения и частоты. Изменение этих величин может оказывать существенное влияние на коэффициент мощности и КПД электроустановок, а при определенных обстоятельствах повлечь выход их из строя.

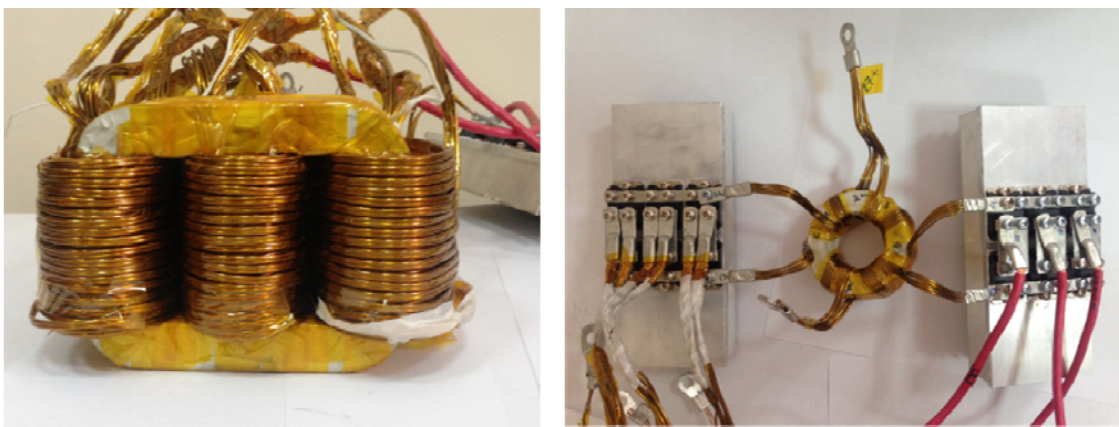
Чувствительны к таким изменениям напряжения нелинейные элементы. При работе в области насыщения увеличение напряжения на 1% приводит к росту реактивной мощности на величину порядка 5%, а при уменьшении напряжения приводит к росту активных потерь ввиду увеличения тока.

Решением проблемы искажения синусоидального сигнала могут выступать LC-фильтры. Различают несколько видов LC-фильтров: полосовой фильтр, резонансный фильтр, фильтр нижних частот [0]. Работа этих фильтров заключается в компенсации гармонических составляющих определенных частот, число которых для схемы LC-фильтров чаще всего не превышает трех. При этом фильтр нижних частот по мощности сопоставим с мощностью самого полупроводникового преобразователя, что существенно сказывается на массе, габаритах и стоимости выпрямительной системы; полосовые фильтры имеют сложную структуру, техническая реализация которой не позволяет данному виду фильтров находить применение в качестве компенсирующих устройств; резонансные фильтры нашли большее применение по сравнению с полосовыми фильтрами и фильтрами нижних частот, однако, не смотря на более высокий коэффициент сглаживания, имеют ярко выраженную корреляцию с частотой резонанса. При изменении частоты, на которую была настроена фильтрация, требуется перенастройка фильтра путем изменения величин фазосдвигающих элементов для корректной работы в новой точке резонанса.

Снижение генерации гармонических составляющих может быть достигнуто и за счет применения трансформаторных преобразователей числа фаз, каждая фаза которого работает на отдельную ветвь выпрямителя. Здесь же необходимо отметить, что чем больше число фаз на выходе преобразователя, тем меньше искажений вносится в форму кривой выходного напряжения и она становится более близкой к синусоидальной.

Разработанный на кафедре электромеханики ФГБОУ ВО «УГАТУ» трансформаторный преобразователь числа фаз позволяет существенно сгладить амплитуду пульсаций, генерируемых в сеть при его работе на выпрямитель. Внешний вид трансформатора и его выпрямительного устройства представлен на рисунке 2.

По результатам гармонического анализа разработанной системы установлено, что в кривой тока помимо основной гармоники содержатся высшие гармонические составляющие 5-го, 7-го, 11-го, 13-го, 17-го и 19-го порядка, подчиняющиеся закону:  $n = mk \pm 1$ , где  $m$  – число фаз, а  $k$  – последовательный ряд натуральных чисел (0, 1, 2...). При этом доля наибольшей по величине, 11-ой гармоники, находится в пределах 9% от основной, а суммарная доля указанных гармоник составляет 36,2% от основной.



*Рис. 4. Трансформатор и выпрямитель*

Таким образом, применение трансформаторных преобразователей числа фаз в выпрямительных системах является эффективной заменой использованию

LC-фильтров, применение которых жестко завязано на рабочую частоту генерации гармонических и субгармонических составляющих.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов, Ю.К. Основы силовой преобразовательной техники / Ю.К. Розанов– М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
2. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.
3. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. ГОСТ 24376-91 Инверторы полупроводниковые. Общие технические условия
5. Нормы 8-95 с изменением №1 Радиопомехи промышленные. Электроустройства, эксплуатируемые вне жилых домов. Предприятия на выделенных территориях или в отдельных зданиях. Допустимые значения. Методы испытаний. Москва, 1997
6. Жежеленко А.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 272 с.

*Чуянов Д. Ю.*

АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» Филиал в Приволжском федеральном округе

## **МОДЕЛИРОВАНИЯ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИ ВРАЩЕНИИ**

*Аннотация:* Рассмотрение метода расчета точной компьютерной модели шагового двигателя, с целью возможности оптимизации конструкции и высокоточной отладки системы управления. Такой подход позволит на этапе проектирования получить модель с учетом необходимых требований к точности поворота ротора.

*Ключевые слова:* шаговый двигатель, ротор, статор, венец, постоянные магниты, шаг перемещения, система управления, демпфирование, пульсации.

### 1. ТИПЫ КОНСТРУКЦИИ

Шаговый двигатель можно рассматривать как синхронный двигатель, который вращается дискретно и пошагово. Эти приводы являются идеальными вариантами для мест, где нужен точный контроль позиции. Более того, по сравнению с другими синхронными двигателями у них высокий крутящий момент, но низкая скорость, которая обусловлена их конструкцией и применяются в сферах, таких как роботы и станки с ЧПУ.

Шаговые двигатели бывают 3 типов, реактивный двигатель (с переменным магнитным сопротивлением), с постоянными магнитами и

гибридный шаговый двигатель. Реактивный двигатель имеет зубчатый ротор и зубчатый статор. Двигатель с постоянными магнитами не имеет зубов на своем роторе, и состоит из постоянных магнитов. Гибридный двигатель имеет зубчатый ротор с постоянными магнитами внутри него. Этот тип имеет высокий крутящий момент и маленький шаг.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

В отличие от других типов электродвигателей, гибридные шаговые двигатели имеют зубчатый ротор и статор. Ротор имеет два венца, которые смещены относительно друг друга, а цилиндрический постоянный магнит между ними, делает одну половину ротора N-полюсом, а другой - S-полюсом. Статор имеет несколько полюсов с катушкой/катушками на каждом из них [1].

Для 2-фазных шаговых двигателей с шагом 1,8 механических градусов ротор имеет 100 зубов, статор имеет 8 полюсов - 4 полюса для каждой фазы. Катушки в соседних полюсах в пределах одной фазы имеют противоположные направления, делающие противоположные магнитные потоки (Рис. 1).

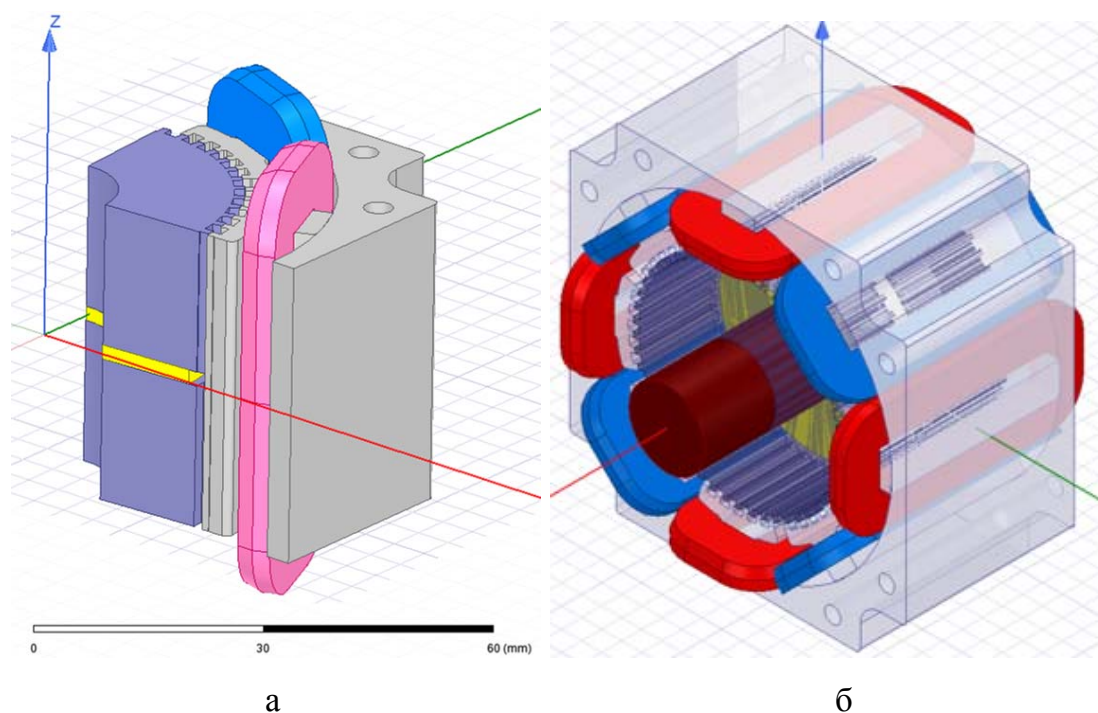


Рис. 1. Конструкция двигателя:  
а -  $\frac{1}{4}$  часть; б - полная конструкция

При такой конструкции для вращения, на каждый шаг времени возбуждена одна фаза. При возбуждении катушек на каждой фазе два полюса фазы становятся однонаправленными полюсами. Поэтому магнитный поток пройдет четверть статора и достигнет ротора. Моделирование двигателя и системы управления проводилось в программном продукте ANSYS Maxwell [2, 3] и ANSYS Twin Builder [4, 5]. Для снижения системных требований при 3D моделировании, расчет проводился только для  $\frac{1}{4}$  части модели. С указанием граничных условий и необходимых параметров, описывающих полную модель. В этом случае для модели была сгенерирована сеточная модель в 150798 ячеек (тетраэдров).

В результате моделирования получили распределение поля индукции в роторе (Рис. 2а) и статоре (Рис. 2б). Что говорит о корректности модели. Для использования этой модели с системой управления была создана ESE модель (эквивалентная схема замещения). Для ее получения был проведен расчет во всем диапазоне управляющих токов (Рис. 3).

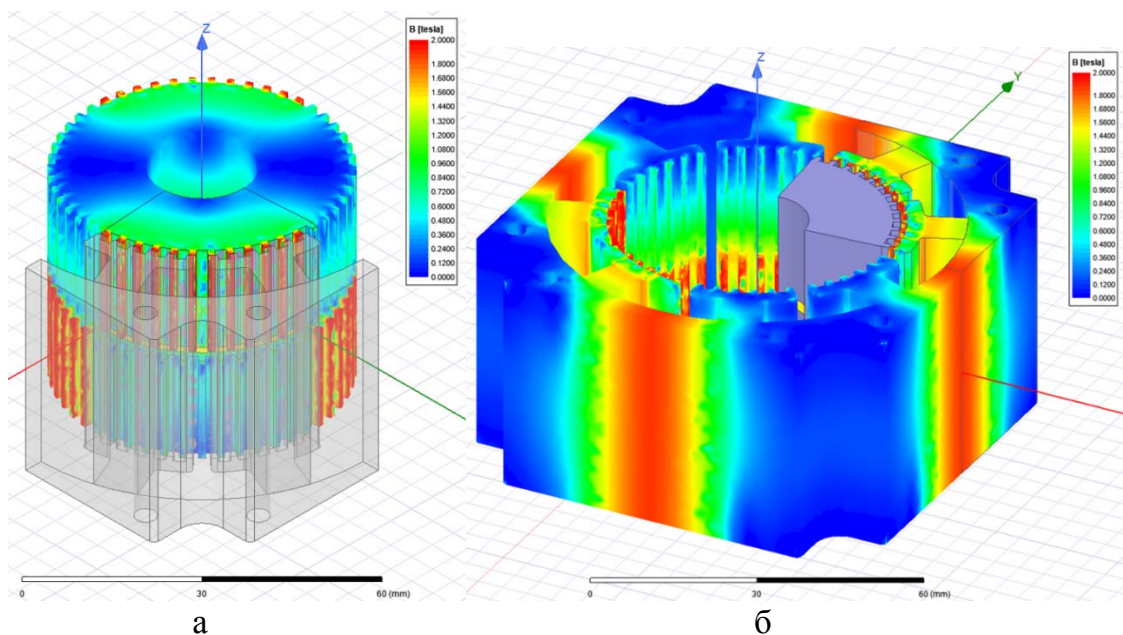


Рис. 2. Распределение индукции:  
а - в роторе; б - в статоре



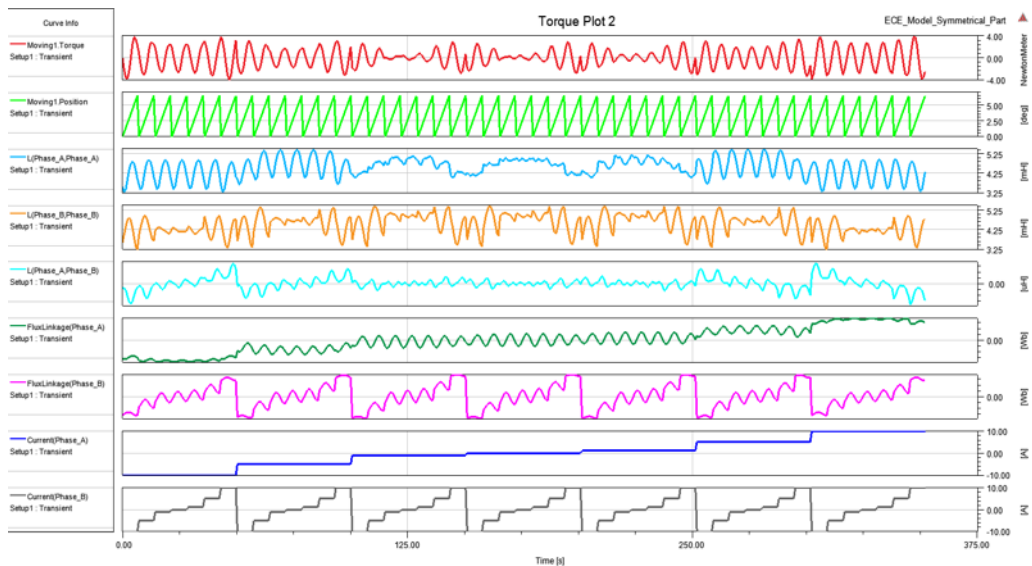


Рис. 3. Результат расчета в диапазоне токов фаз и положениях ротора

На основании полученной ЕСЕ-модели была собрана система управления привода (рис. 4), на основании которой был проведен анализ работы привода без демпфирования (рис. 5) и с демпфированием (рис. 6). Благодаря ЕСЕ-модели, данный анализ занял несколько десятков секунд. Из полученных графиков тока и перемещения видно величину снижения перерегулирования при переключении фаз.

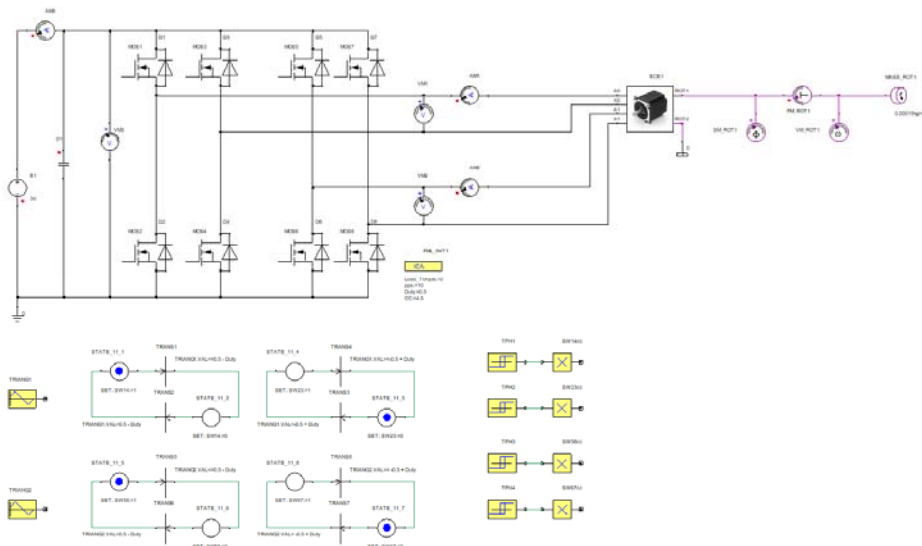


Рис. 4. Схема управления шаговым двигателем в ANSYS Twin Builder

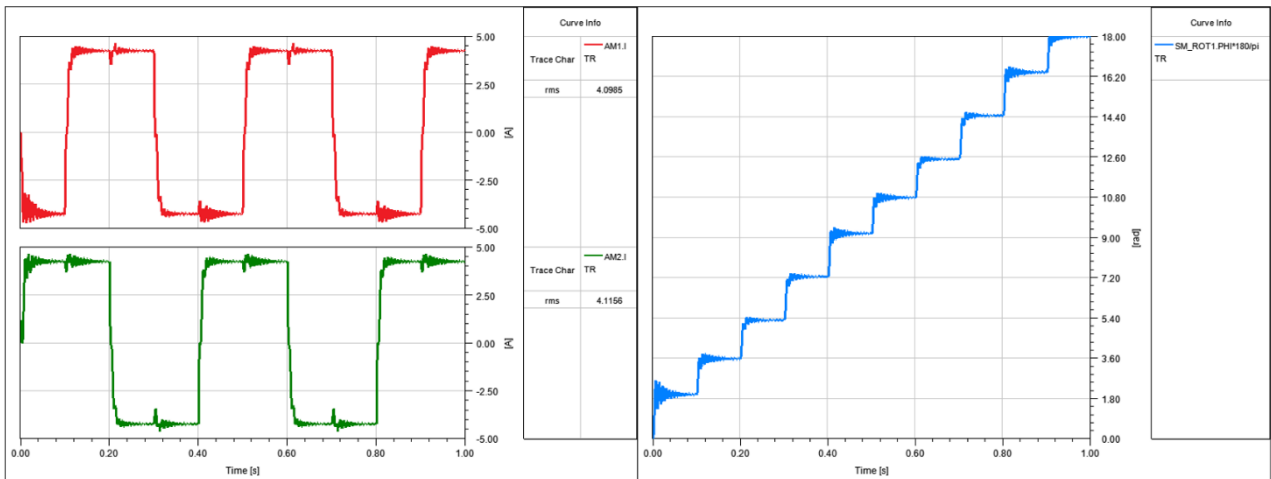


Рис. 5. Результаты моделирования в режиме полного шага без демпфирования

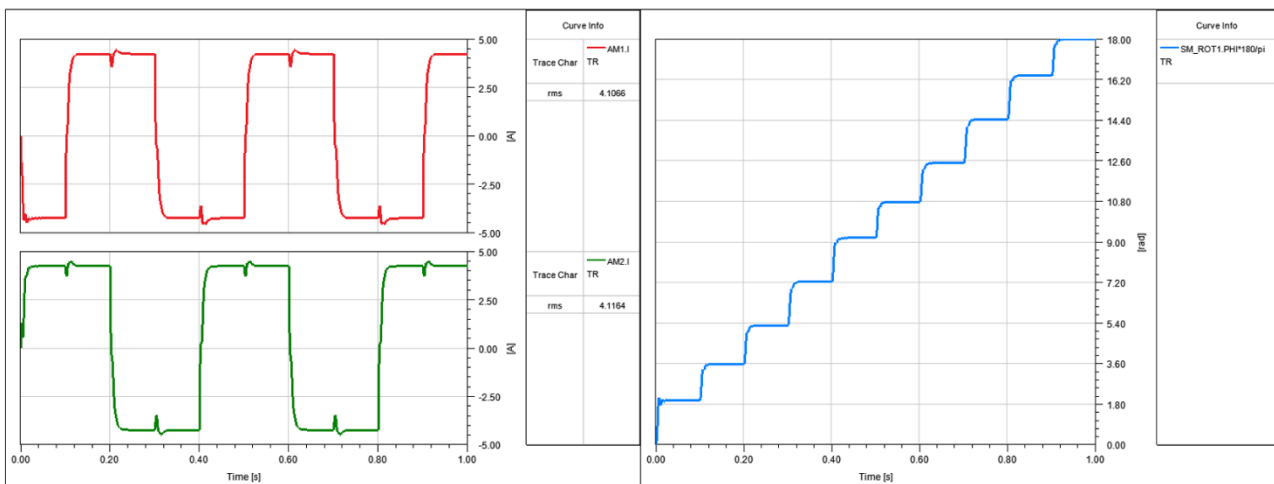


Рис. 6. Результаты моделирования в режиме полного шага с демпфированием

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Hojati, A. Baktash. Design and fabrication of a new hybrid stepper motor with significant improvements in torque density. /Engineering Science and Technology, an International Journal. 24 (5), 2021, 1116-1122
2. ANSYS Maxwell User's Guide – SAS, 2021 [Электронное издание].
3. ANSYS Maxwell Theory Guide – SAS, 2021 [Электронное издание].
4. ANSYS Twin Builder User's Guide – SAS, 2021 [Электронное издание].
5. ANSYS Twin Builder Theory Guide – SAS, 2021 [Электронное издание].

*Мулькаманов Э. Р., Саттаров Р. Р.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ-СЕТЬ»**

*Аннотация:* В публикации затрагивается тема Vehicle-To-Grid. Поясняется почему актуально её вводить. Приводится модель системы. Рассматриваются основные моменты в ней, её возможности, трудности с которыми придется столкнуться. На некоторых этапах идет сравнение с другими накопителями энергии.

*Ключевые слова:* V2G, зарядное устройство, электромобиль, пики нагрузки. V2G, charger, vehicle, load peak.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время необходимо направить усилия на решение экологических проблем. Одной из основных экологических проблем является загрязнения воздуха в результате сгорания топлива. Одно из решений избавления или уменьшение источников выброса вредных веществ, за счет уменьшения загрязняющих производств. Поэтому сейчас происходит активный переход к альтернативным источникам энергии и электромобилям. [1]

Для ускорения процесса достижений целей, мы должны мотивировать другие отрасли помогать в развитии наших интересов. Для перехода к электромобилям необходимо перейти к новому виду заправочных станций, в статье называемых зарядных станций. Электромобильная индустрия сильно повлияет на электрическую сеть. Как в плане нагрузки, так в плане и распределения этой нагрузки.

В энергосистеме необходимо поддерживать баланс мощности - потребляемая мощность должна быть равна генерируемой. С каждым годом все значительнее становится актуальна проблема сильной разности пиков нагрузки ночью и днем. Данное явление происходит из-за набирающих популярность возобновляемыми источниками энергии, повышением потребляемой мощности. Ввиду этого используют накопители энергии [2]. Они накапливают энергию ночью и отдают днем, тем самым выравнивая суточный график нагрузки.

Вскоре и электромобили принесут значительное влияние на пики нагрузок. В данной статье рассматривается система Vehicle-To-Grids (V2G).

Данная система включает в себя электромобиль и электрическую сеть. Мы подпитываем нашу сеть от электромобиля, используя его аккумулятор как хранилище энергии. Мы рассмотрим положительные и отрицательные стороны и перспективна ли она, и её возможности.

Для понимания принципа работы V2G, приведем одну из возможных ситуаций: люди приезжают домой, где заряжают аккумулятор электромобиля, после утром едут на работу, где может быть установлена система V2G для разрядки заряженной энергии в ночное время дома.

В статье людей, которые имеют электромобиль и дают его для использования как хранилище мы называем “потребителями”.

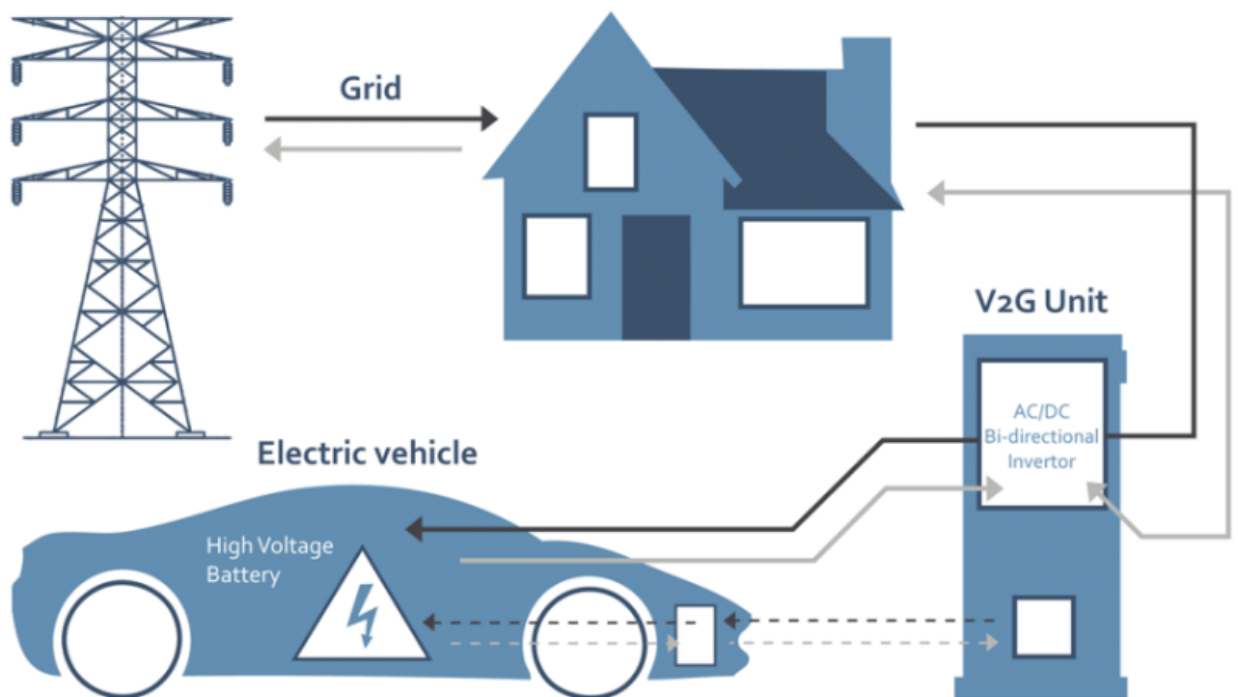


Рис. 1. Система Vehicle-To-Grid

## 1. МОДЕЛЬ VEHICLE-TO-GRID

На рис. 2 представлена модель зарядки постоянного тока. Данная модель описывает общий принцип работы системы зарядки и разрядки аккумулятора [3]. В данной модели блок «Grid/Load» является сетью при зарядке автомобиля и нагрузкой при разрядке электромобиля. «AC-DC converts» преобразователь переменного тока в постоянный. «DC/DC» данный блок поясняется рис. 3. Блок

«XEV Battery» является системой управления батареями. «Human-Machine-Interface (HMI)» - интерфейс для управления потребителем зарядкой и разрядкой электромобиля. Нижняя часть не так интересна для рассмотрения в нашей статье, в ней элементы для безопасности, контроля и управления элементами.

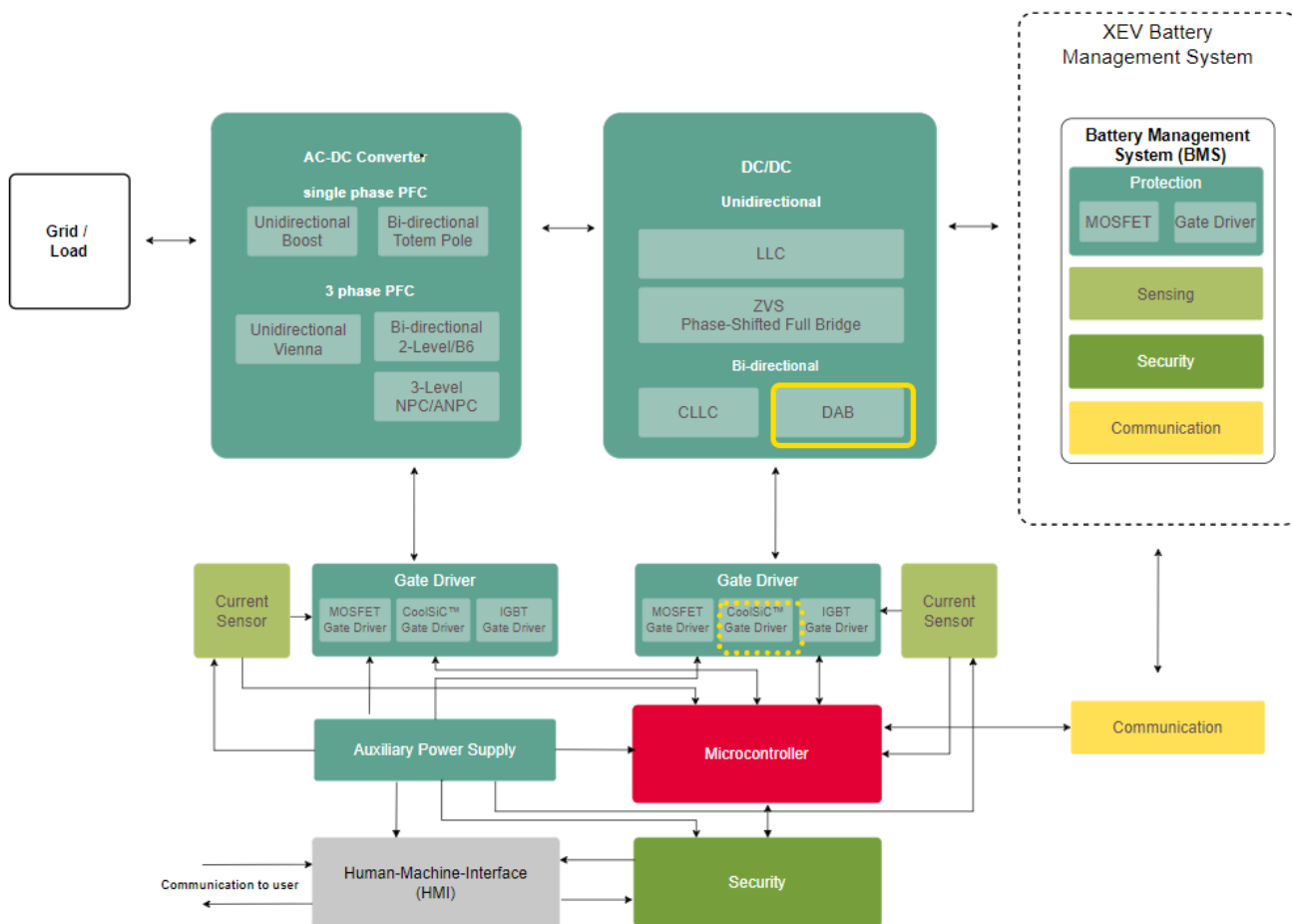


Рис. 2. Настенный управляюще-силовой блок зарядной станции [3]

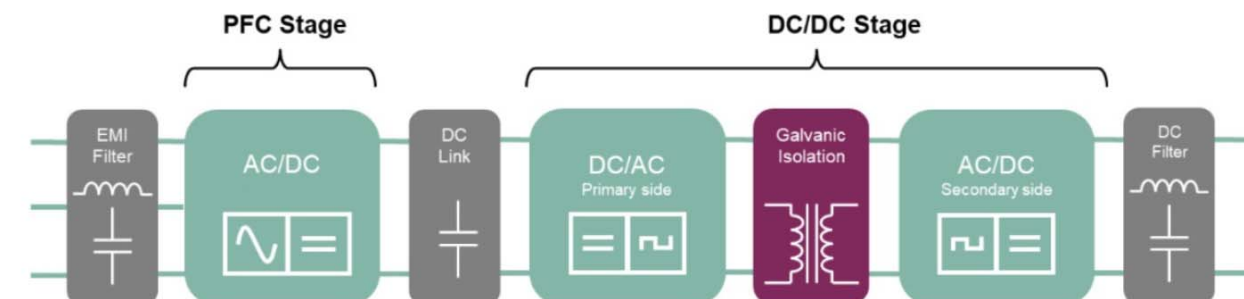


Рис.3. Пример топологии питания на каскаде PFC и DC/DC [3]

## 2. АСПЕКТЫ VEHICLE-TO-GRID

### 3.1 Уменьшение пиков нагрузки.

Все больше набирает популярность быстрые зарядки для электромобилей. Быстрые зарядки потребляют мощность из сети, сильно превышающую мощность обычной зарядки, что ведет за собой быстрое изменение нагрузки. В следствии, увеличиваются и пики нагрузки. Для системы V2G также необходимы быстрые зарядки, для выдачи как можно большей энергии за короткие сроки, маневренности.

Главной целью и наиболее важной положительной стороной системы является, что она может «перебрасывать» энергию с дневной на ночную. Снижение пиков дает возможность не запускать каждый раз оборудование, также со снижением пиков станет легче регулировать электроэнергию, улучшатся экономические показатели и другие положительные эффекты на энергосистему.

В статье [4] приводится лучшая на данный момент стратегия планирования зарядки и разрядки электромобилей. Она имеет наименьшие затраты на эксплуатацию сети, наименьшие загрязнения, минимальную разность впадин пиков, минимальную стоимость зарядки и др.

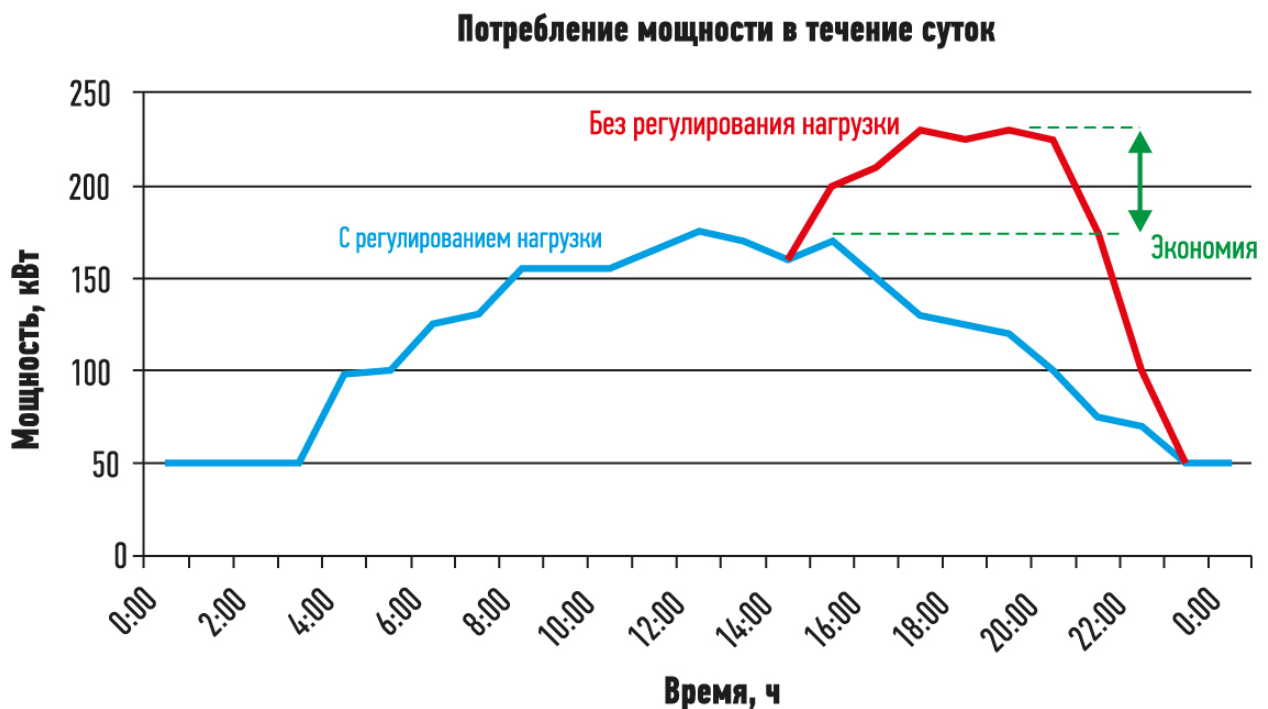


Рис. 4. Уменьшение пиков нагрузки

### 3.2 Накопленная мощность

Будем рассматривать средний город в России – Уфа. По прогнозам в 2030 году будет 600 тысяч автомобилей. Рассмотрим минимум, который может быть в будущем. Если хотя бы 10% будут электромобили, то это 60 тысяч автомобилей. Также надо учесть, что не все смогут стоять на месте, в итоге вероятно останется лишь 20% от 60 тысяч, поэтому берем 12 тысяч электромобилей. Запас одного электромобиля возьмем средний в 100 кВт\*ч. Вдобавок мы не можем использовать весь запас электромобиля, ведь потребителям нужен запас мощности.. Возьмем 50% от данной мощности, то есть каждая машина может в течении часа выдавать 50 кВт. Получаем 600 МВт в час. Данная цифра на данный момент сможет покрыть несколько пиков. Здесь не учтены многие моменты такие как:

- Емкость электромобилей. В будущем она может расти и уменьшаться. В данный момент она на уровне 100 кВт\*ч. Вероятно она будет расти, а в связи с тем, что на данный момент много машин менее 100 кВт\*ч, то за среднее мы возьмем 100 кВт\*ч.
- Не учтены точные значения припаркованных электромобилей. Это могут быть люди, которые приехали просто в магазин на час, а могут быть люди, которые на целый день оставили автомобиль.
- Пики все время растут, поэтому в будущем, в том числе и из-за электромобилей, должны сильно возрасти. В таком случае, возможно этой накопленной мощности будет мало.

### 3.3 Регулирование частоты и мощности

Повышенный уровень частоты влечет за собой избыток генерируемой активной мощности, также наоборот, пониженный уровень влечет за собой недостаток генерируемой мощности. Мы можем улучшать качество выдаваемой электроэнергии. Мы можем регулировать выдаваемую мощность. Тем самым регулируем частоту изменением выдаваемой мощности. Когда дельта  $f$  будет находится в рабочем диапазоне, электромобиль будет заряжать или разряжать активную мощность. В статье [5] дается модель парковки с

характеристиками частоты, активной мощности и другие. В ней рассказывается почему эта система лучше других, как она работает и что она дает энергосистеме. Поэтому мы не будем в данной статье уделять этому отдельное внимание, как и многим другим вещам.

Стоит помнить, что с добавлением любого оборудования на зарядные станции их цена возрастает.

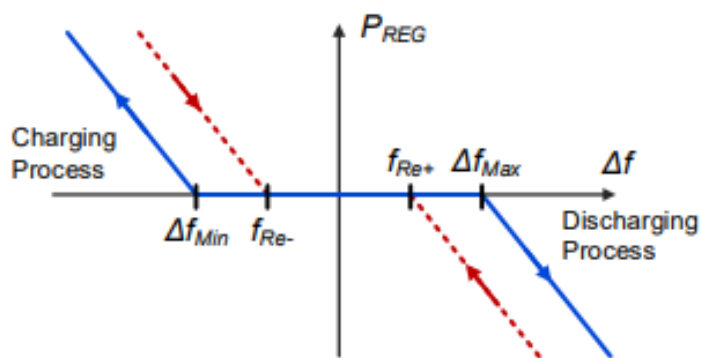


Рис. 5. Характер режима регулирования частоты V2G [5]

### 3.4 Уменьшение высших гармоник

Зарядную станцию можно использовать для погашения высших гармоник. FHC-регулятор гасит 5 гармонику на 76,34% [6], на рисунке 4 видим, что уменьшает в основном только 5 гармоник, остальные незначительно меняются. Высшие гармоники ведут к чрезмерному нагреву, ложному срабатыванию автоматики, асимметрии в сетях, негативно влияют на устройства коммуникации. Поэтому их стремятся погасить, приведенная система проста и эффективна.

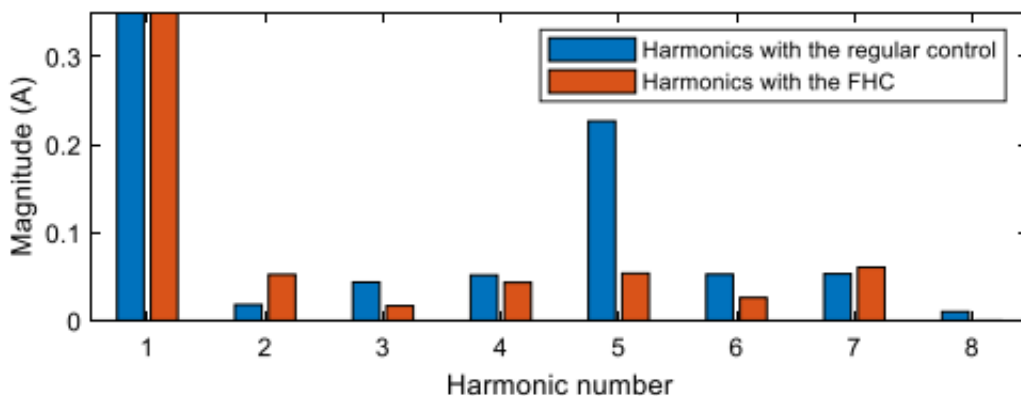


Рис. 6. Гармоническое разложение подаваемого тока с помощью FHC [6]



### 3.5 Место

В отличие от других накопителей энергии, которые занимают значительную область, зарядные станции в принципе могут не занимать места. Они могут быть установлены практически везде, даже в земле с необходимым охлаждением. Важным вопросом является распределение зарядных станций. Неправильное расположение может привести к ряду негативных эффектов [7].

### 3.6 Потери.

Дополнительные элемент в сети — это излишние потери. По опыту пользования людей в интернете можно принять потери порядка 10% при зарядке автомобиля [8], если принимать потери при разрядке равными. Как указывалось выше, мы должны оплатить потери в обе стороны, таким образом мы теряем 20% электроэнергии.

У современных гидроаккумулирующих электростанций ГАЭС КПД достигает в 75%. У воздушно-аккумулирующей электростанции (ВАЭС) достигает 70%. КПД меньше, но мы не должны платить потребителю.

Не учитывается тот факт, что до сих пор электромобильная индустрия не была направлена на данную тематику и скорее всего можно существенно уменьшить данные потери, сейчас уже есть зарядные устройства с потерями порядка 5%.

### 3.7 Непостоянство хранилища.

Благодаря вероятностным распределением, мы можем вывести некоторое значение мощности, которое вероятно будет доступно, но будут дни, когда малое количество доступной резервной мощности.

В статье [5]. Приводится график, но они не учитывают недельные, месячные, годовые нагрузки в которых массово люди не смогут ставить на специальные места для пользования их аккумулятором. Например, на праздники люди могут уехать в другие города или просто поставить к себе в гараж. Таким образом, мы иногда не сможем сказать точно сколько будет доступно резервной мощности.

### 3.8 Выгода

Из-за дневной деятельности человека, нагрузка днем сильно превосходит ночную, поэтому дневная энергия намного ценнее, чем ночная. Следовательно, тариф ночной энергии ниже, чем у дневной. Благодаря данной особенности, электромобиль можно будет заряжать ночью, более дешевую энергию и отдавать днем. Полученная выгода на уровне сети получается из разности цены продажи в дневном тарифе (желательно вне России) и цены ночного тарифа.

Но необходимо заплатить потребителю за использованный ресурс аккумулятора, ведь аккумулятор имеет ограниченное количество циклов. Потребителю необходимо давать надбавку за выдаваемую энергию. Также мы должны оплатить потери при зарядке и при разрядке, либо увеличить надбавку, что есть тоже самое.

Вариант формулы выгоды для потребителя:

$$V_{п} = (S_{отд} - S_{пол} \cdot C_{н}) \cdot k_{потери} \cdot k_{изн} \cdot k_{надб}$$

Вариант формулы для «энергосистемы»:

$$V_{эн} = \frac{S_{отд} \cdot C_{д} - S_{пол} \cdot C_{н}}{k_{потери} \cdot k_{изн} \cdot k_{надб}}$$

$S_{пол}$ -количество энергии получаемое потребителем,

$S_{отд}$ -количество электроэнергии отдаваемое потребителем,

$C_{д}$ -цена электроэнергии днем,

$C_{н}$ -цена электроэнергии ночью,

$k_{потери}$ -потери при зарядке аккумулятора $<1$ ,

$k_{изн}$ -коэффициент износа аккумулятора $>1$ ,

$k_{надб}$ -коэффициент надбавки $>1$ .

Нам необходимо платить за лишние потери, а также надбавку потребителю, что выглядит не выгодным. Но аргументом в сторону данной системы является саморазряд аккумуляторов, за который мы не платим, как в случае, если бы они были энергосистемы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены различные аспекты системы Vehicle-To-Grid. Определенно не все пункты можно поделить на положительные и отрицательные, так регулирование гашение гармоник положительный аспект, но довольно бесполезный в данной системе, который удорожает станцию.

Главная цель и положительный эффект от данной системы — это уменьшение пиков нагрузки, остальные такие как уменьшение гармоник и регулирование частоты и мощности побочные эффекты, которые могут быть невыгодны. С отрицательной стороны мы получаем дополнительные потери в цепи энергосистемы, непостоянство хранилища, ухудшения качество тока. Также отметим, что преимуществом системы является то, что она не требует отдельного большого количества выделенного места.

В связи с приведенными «за» и «против» можно сказать, что данная система перспективна. В ближайшем будущем для улучшения данной системы можно улучшить КПД данной системы, уменьшив потери на зарядку и разрядку. Также существует вопрос о сигналах, зарядная станция должна понимать, когда отдавать энергию, а когда принимать.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любов В.К. Уменьшения загрязнения окружающей среды//УДК 621.182.64 - 2008
2. Зырянов В.М. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт// Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А.//УДК 621.311 - 2020
3. DC wallbox [Электронный ресурс] – сайт. <https://www.infineon.com/cms/en/applications/industrial/fast-ev-charging/dc-wallbox/>
4. Wan-Jun Yin. Electric vehicle charging and discharging scheduling strategy based on local search and competitive learning particle swarm optimization algorithm// Wan-Jun Yin, Zheng-Feng Ming// Scopus - 2021
5. Paramet Wirasanti. Frequency regulation service of multiple-areas vehicle to grid application in hierarchical control architecture// Paramet Wirasanti, Suttichai Premrudeepreechacharn // Scopus, Vol. 11, No. 6, 2021, pp. 4597~4609
6. Gonzalez M, Asensio FJ, San Martín JI, Zamora I, Cortajarena JA, Oñederra O. Vehicle-to-grid charging control strategy aimed at minimizing harmonic disturbances. // Scopus, Int J Energy Res. 2021;45(11): 16478–16488.
7. Weiwei Kong, Yugong Luo, Guixuan Feng, Keqiang Li, Huei Peng. Optimal location planning method of fast charging station for electric vehicles considering operators, drivers, vehicles, traffic flow and power grid, // Scopus - 2019
8. Потери при зарядке электромобиля [Электронный ресурс] – сайт. - <https://www.drive2.ru/l/588170827090944740/>

*Шмелев А. А., Ясовеев В. Х.<sup>1</sup>, Юмагузин А. Р.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет

<sup>2</sup>Башкирский государственный университет

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS**

*Аннотация:* В статье рассматривается математическая модель магнитострикционного преобразователя линейных перемещений реализованной на основе программного пакета COMSOL MULTIPHYSICS

*Ключевые слова:* *Магнитострикционные преобразователи линейных перемещений, МПП, математическая модель МПП, COMSOL MULTIPHYSICS*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Непрерывный рост требований к уровню качества технических средств выдвигает необходимость повышения точности средств измерений, применяемых повсеместно, в том числе в сфере контроля и управления. Для решения данной задачи, необходимо создание математической модели, учитывающей все физические процессы, происходящие в первичном МПП. В настоящее время не существуют математические модели МПП, которые бы описывали протекающие процессы в первичном МПП как единое целое. Использование таких моделей на постоянной основе является не целесообразным, так как необходимо много времени на просчет модели при изменении параметров и характеристик материалов. Так же существует вероятность допустить ошибку в расчетах. Отсутствует визуальный контроль изменений расчетных параметров [2], [3].

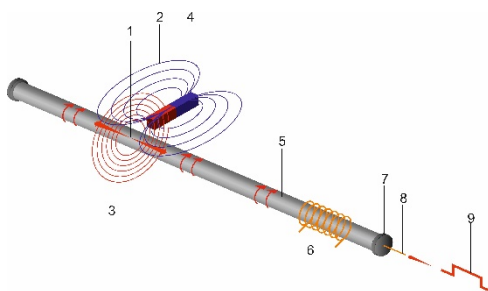
### **1. МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**

#### **1.2. Принцип действия магнитострикционных датчиков линейного перемещения**

В качестве первичного МПП используется конструкция, представленная на рисунке 1, которая состоит из таких основных частей как: волновод;

позиционер, содержащий постоянный магнит; катушка считывания информационного сигнала; демпфирующий узел.

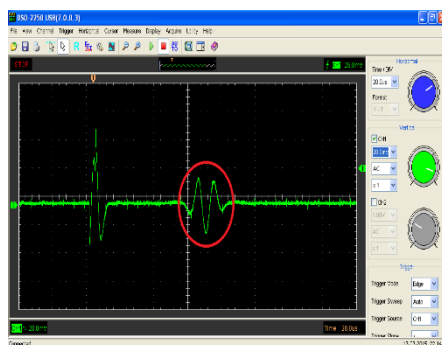
Волновод датчика изготовлен из магнестрикционного материала. При прохождении импульса тока по волноводу, вокруг него образуется радиальное магнитное поле. Это поле, при взаимодействии с магнитным полем постоянного магнита, вызывает ультразвуковую волну, которая распространяется от места возникновения в оба конца волновода. В одном из концов волна демпфируется, что позволяет исключить помехи от отраженных волн [1].



*Рис. 1. Конструкция МПП:*

*1 – направления распространения ультразвуковой волны; 2 – магнитное поле постоянного магнита-позионера; 3 – магнитное поле, создаваемое возбуждающим импульсом тока; 4 – постоянный магнит; 5 – волновод; 6 – катушка считывания информационного сигнала; 7 – акустический демпфер; 8 – контакт ввода возбуждающего импульса тока; 9 – форма возбуждающего импульса тока*

Информационный сигнал, полученный с катушки считывания подвергается дальнейшей обработке и представлен на осциллограмме (Рис. 2) [2].



*Рис. 2. Осциллограмма информационного сигнала МПП*

## 2.ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS

Описание законов физики для задач, зависящих от пространства и времени, обычно выражается в терминах уравнений в частных производных (PDE). Для подавляющего большинства геометрий и задач эти PDE не могут быть решены аналитическими методами. Вместо этого можно построить аппроксимацию уравнений, обычно основанную на различных типах дискретизации. Эти методы дискретизации аппроксимируют PDE уравнениями численной модели, которые могут быть решены с использованием численных методов. Решение численных уравнений модели, в свою очередь, является приближением реального решения уравнений в частных производных. Метод конечных элементов (FEM) используется для вычисления рассмотренных выше приближений [5].

Одним из преимуществ использования метода конечных элементов является то, что он предлагает большую свободу в выборе дискретизации как в элементах, которые могут использоваться для дискретизации пространства, так и в базисных функциях.

Еще одно преимущество метода конечных элементов состоит в том, что теория хорошо разработана.

COMSOL MULTIPHYSICS унифицирует рабочий процесс решения инженерных и научных задач с помощью численных методов.

Программный пакет COMSOL MULTIPHYSICS содержит готовые физические интерфейсы для моделирования самых разных физических явлений, в том числе распространенных междисциплинарных мульти физических взаимодействий. Физические интерфейсы — это специализированные пользовательские интерфейсы для отдельной инженерной или исследовательской области, которые позволяют досконально управлять моделированием исследуемого физического явления или явлений — от задания исходных параметров модели и дискретизации до анализа результатов.

Физические интерфейсы можно свободно сочетать, чтобы описывать процессы, включающие несколько явлений.

В данной работе использовались два интерфейса: *Magnetic fields*, где моделировалась магнитострикция, учет поля катушки, магнита, прохождение импульса тока и *Solid Mechanics*, в котором учитывалось напряжение материала и его связь магнитострикцией.

После выбора физического интерфейса программный пакет предлагает выбрать один из типов исследований, например, с использованием нестационарного или стационарного решателя. Программа также автоматически подбирает для математической модели подходящую численную дискретизацию, конфигурацию решателя и настройки визуализации и постобработки, подходящие для исследуемого физического явления.

Интерпретатор уравнений программного пакета COMSOL Multiphysics предоставляет наилучшие входные данные для численного моделирования - полностью связанные системы дифференциальных уравнений в частных производных для стационарных и нестационарных исследований, исследований в частотной области и исследований на собственные значения. Системы дифференциальных уравнений в частных производных дискретизируются по пространственным координатам ( $x, y, z$ ) методом конечных элементов (FEM). В некоторых типах задач для дискретизации пространства используется метод конечных элементов (BEM). Для пространственно-временных задач используется метод прямых, в котором пространство дискретизируется методом конечных элементов (или методом граничных элементов) с получением системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Эти уравнения затем решаются различными сложными методами, включая явные и неявные схемы дискретизации по времени.

Стационарные и нестационарные задачи могут быть нелинейными, что приводит, после дискретизации, к получению систем нелинейных уравнений. Численные методы, реализованные в COMSOL Multiphysics, позволяют получить полностью связанный якобиан для решения нелинейной системы. Для

решения нелинейных стационарных задач и при дискретизации нелинейных задач с зависимостью от времени используется метод Ньютона с затуханием. Метод Ньютона позволяет решить набор систем линейных уравнений, пользуясь якобианом, и найти решение для нелинейной системы.

Для линейных задач (также решаемых на каждом шаге решения нелинейной задачи, см. выше) программный пакет COMSOL MULTIPHYSICS содержит прямые и итерационные решатели. Прямые решатели подходят для задач малого и среднего размера, а итеративные — для больших систем линейных уравнений. Программный пакет COMSOL MULTIPHYSICS содержит набор итерационных решателей и современных методов задания предварительных условий – предобуславливателей, в частности, многосеточные. Они обеспечивают высокую надежность и скорость интерактивных расчетов [4].

### 3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS ОПИСАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

Интерфейс «Magnetic Fields (mf)», находящийся в ветви «AC/DC» «Электромагнитные поля» при добавлении физического интерфейса, используется для вычисления распределения магнитного поля и индуцированного тока в катушках, проводниках и магнитах и вокруг них. Физический интерфейс решает уравнения Максвелла, которые формулируются с использованием векторного магнитного потенциала.

Основным узлом является закон Ампера, который добавляет уравнение для магнитного векторного потенциала и предоставляет интерфейс для определения определяющих соотношений и связанных с ними свойств, таких как относительная проницаемость.

$$\begin{cases} \mathbf{J} = \text{rot } \mathbf{H}; \\ \mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}; \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}; \\ \mathbf{B} = \mu_0 \mu_{\text{rrel}} \mathbf{H} + \mathbf{B}_{\text{ext}} \end{cases} \quad (1)$$



где

$J$  – плотность электрического тока;

$H$  – напряжённость магнитного поля;

$B$  – магнитная индукция;

$A$  – векторный потенциал;

$\sigma$  – удельная проводимость среды;

$E$  – напряжённость электрического поля;

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\mu_{res}$  - остаточная магнитная проницаемость (из данных материала);

Остаточная магнитная индукция:

$$B_r = \left| |B_r| \right| \frac{e}{|e|}. \quad (5)$$

Проницаемость отдачи  $\mu_{res}$  очень похожа на относительную проницаемость и действительна до тех пор, пока магнит находится в нормальных условиях эксплуатации (она действительна только в линейной области, близкой к вертикальной оси  $H = 0$ ).  $B_r$  дается путем умножения нормы остаточной плотности потока (обеспечиваемой материалом) на нормированное поле направления, указанное в узле COMSOL MULTIPHYSICS Magnetic Fields – Ampere’s Law 2 [4].

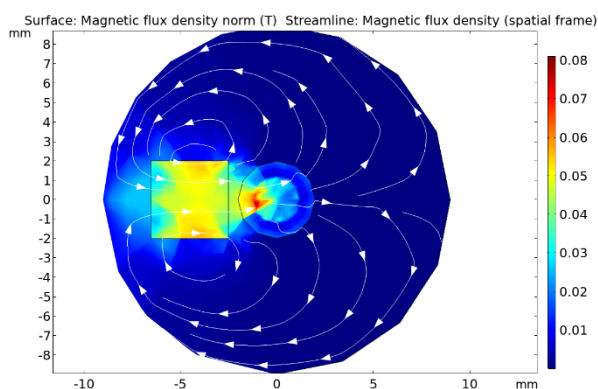


Рис. 3. График влияния магнитного поля постоянного магнита на магнитоотрицательный волновод

#### 4. ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ВОЛНОВОДА

Модель намагниченности выбирается как модель Ланжевена.

Соотношение, которое описывает макроскопические свойства среды (плотность магнитного потока  $\mathbf{B}$  и магнитное поле  $\mathbf{H}$ ) для магнитоэластичного материала

$$\mathbf{B} = \mu_0[\mathbf{H} + \mathbf{M}(\mathbf{H}, S_{\text{magn}}) + \mathbf{M}_r], \quad (3)$$

где

$\mathbf{M}(\mathbf{H}, S_{\text{magn}})$  – это намагниченность материала, зависящая от магнитного поля и механического напряжения;

$\mathbf{M}_r = \mathbf{0}$  (для данной задачи) – остаточная намагниченность.

Основные уравнения для магнитоэластики:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{0} = \nabla \cdot (\mathbf{F}\mathbf{S})^T + \mathbf{F}_V; \\ \mathbf{F} = \mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}; \\ \mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + J_1 \mathbf{F}_{\text{inel}}^T (\mathbf{C}_H : \boldsymbol{\epsilon}_{\text{el}}) \mathbf{F}_{\text{inel}}^{-1} - \mathbf{C}_H : \boldsymbol{\epsilon}_{\text{me}}(\mathbf{M}); \\ \boldsymbol{\epsilon}_{\text{el}} = \frac{1}{2} (\mathbf{F}_{\text{el}}^T \mathbf{F}_{\text{el}} - \mathbf{1}); \\ \mathbf{F}_{\text{el}} = \mathbf{F} \mathbf{F}_{\text{inel}}^{-1}; \\ \boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \nabla \mathbf{u}]; \\ \mathbf{B} = \mu_{0, \text{VAC}} (J \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{M}); \\ J = \det(\mathbf{F}); \\ \mathbf{C} = \mathbf{F}^T, \end{array} \right. \quad (4)$$

где

$\nabla$  – оператор Гамильтона;

$\mathbf{F}$  – тензор градиента деформации;

$\mathbf{S}_0$  – начальное напряжение;

$\mathbf{S}$  – второе напряжение Пиолы-Кирхгофа;

$\mathbf{F}_V$  – объемная сила на единицу деформируемого объема;

$\mathbf{I}$  – единичная матрица;

$\mathbf{u}$  – вектор смещения;

$\mathbf{C}_H$  – тензор упругости 4-го порядка;

$F_{inel}$  – тензор градиента неупругой деформации

$\epsilon_{el}$  – упругая деформация;

$$C_H: \epsilon_{el} = C_H^{ijkl} \epsilon_{el,kl};$$

$F_{el}$  – тензор градиента упругой деформации;

$\epsilon$  – полная деформация;

$C$  – тензор деформации Коши – Грина.

Модель используется нелинейная и изотропная:

$$\epsilon_{me} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{M_s^2} dev(M \otimes M), \quad (5)$$

$$(M \otimes M)_{ij} = M_i M_j = \begin{vmatrix} M_1 M_1 & M_1 M_2 & M_1 M_3 \\ M_2 M_1 & M_2 M_2 & M_2 M_3 \\ M_3 M_1 & M_3 M_2 & M_3 M_3 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

$$c_H = c_H(E, \nu), \quad (7)$$

$$dev(M \otimes M) = \begin{vmatrix} M_1^2 - \frac{M_s^2}{3} & M_1 M_2 & M_1 M_3 \\ M_2 M_1 & M_2^2 - \frac{M_s^2}{3} & M_2 M_3 \\ M_3 M_1 & M_3 M_2 & M_3^2 - \frac{M_s^2}{3} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где

$\epsilon_{me}$  – магнитоэластичная деформация;

$\lambda_s$  – предельная величина изменения линейных размеров при величине намагниченности насыщения  $M_s$  (для материала);

$$M_s^2 = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 \quad (9)$$

$\nu$  – коэффициент Пуассона (для материала).

Напряжение в магнитоэластичном материале моделируется как

$$S = c_H [\epsilon - \epsilon_{me}(M)]. \quad (10)$$

Для изотропных материалов тензор (матрица) упругости  $C_H$  может быть представлена в виде двух параметров, например, с использованием модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Все домены имеют намагниченность одинаковой величины

$$|M| = M_S, \quad (11)$$

где  $M_S$  – намагниченность насыщения (из материала), но намагниченность может иметь разные ориентации, характеризуемые соответствующим вектором направления:

$$m = |M|/M_S \quad (12)$$

для каждого домена.

Намагниченность материала:

$$M = M_{\text{ан}}(H_{\text{эфф}}), \quad (13)$$

$$M_{\text{ан}} = M_S L(|H_{\text{эфф}}|) \frac{H_{\text{эфф}}}{|H_{\text{эфф}}|}, \quad (14)$$

$$H_{\text{эфф}} = H + \frac{3\lambda_S}{\mu_0 M_S^2} S_{\text{ед}} M, \quad (15)$$

$$S_{\text{ед}} = \text{dev}(c_H : \epsilon_{\text{el}}), \quad (16)$$

где

$H_{\text{эфф}}$  – эффективное магнитное поле.

Функция Ланжевена:

$$L(x) = \coth(x) - \frac{1}{x}, \quad (17)$$

где  $\coth(x)$  - гиперболический котангенс)

т.е.

$$L(|H_{\text{эфф}}|) = \coth\left(\frac{3\chi_m |H_{\text{эфф}}|}{M_S}\right) - \frac{M_S}{3\chi_m |H_{\text{эфф}}|}, \quad (18)$$

где  $\chi_m$  - магнитная восприимчивость в начальной линейной области.

Тензор девиаторных напряжений связан с деформацией как:

$$S_{\text{ед}} = \text{dev}(c_H \epsilon) \quad (19)$$

Кроме того, намагниченность и магнитное поле связаны друг с другом и с вектором магнитной индукции соотношением:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (20)$$

COMSOL MULTIPHYSICS Multiphysics находит вектор магнитного потенциала  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ ). Затем получается  $H$ -поле как функция  $B$ -поля и намагниченности.

## 5. ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

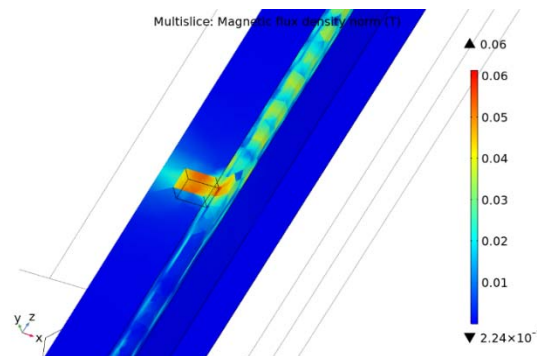


Рис. 4. Визуализация участка в районе постоянного магнита во время процесса возникновения и распространения колебаний по магнестрикционному волноводу

Для упругого материала мощность напряжения - это скорость изменения плотности энергии деформации.

Тензор  $\mathbf{P}$  называется первым тензором напряжений Пиолы-Кирхгофа. Он связывает силы, действующие в пространственных направлениях, с областями в исходной недеформированной конфигурации. Таким образом, его компоненты имеют индексы, относящиеся к разным конфигурациям. Иногда такие математические объекты называют двухточечными тензорами. В общем случае этот тензор не симметричен.

$\mathbf{F}$  - тензор градиента деформации и  $J = \det(\mathbf{F})$  - коэффициент объема,  $\det(\mathbf{F})$  – определитель матрицы  $\mathbf{F}$

Коэффициент объема  $J$  обеспечивает изменение объема, вызванное деформацией. Следовательно, тензоры напряжений связаны соотношением

$$\mathbf{P} = J\sigma\mathbf{F}^{-T}, \quad (21)$$

где

$\mathbf{P}$  – первый тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа;

$\sigma$  – это тензор напряжений;

$F^{-T} = (F^{-1})^T = (F^T)^{-1}$  – транспонированная матрица от обратной матрицы  $F$ .

Используя отношения:

$$\sigma : L = J^{-1} P F^T : L = J^{-1} P : (L * F) = J^{-1} P : \dot{F}, \quad (22)$$

где

«:» – двойное скалярное произведение произвольных тензоров второго ранга;

$L$  – тензор деформаций Грина — Лагранжа;

$$J^{-1} = \frac{1}{J};$$

$F^T$  – транспонированная матрица  $F$ ;

$\dot{F}$  – первая производная по времени  $F$ .

Мощность напряжения может быть представлена в следующей эквивалентной форме:

$$\int_V \sigma : L dV = \int_{V_0} P : \dot{F} dV_0, \quad (23)$$

где

$dV$  - элемент текущего объема,

$dV_0$ -элемент начального объема

Таким образом, можно сказать, что первый тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа и градиент деформации образуют энергетически сопряженную пару. Такие пары также могут называться степенно-сопряженными или рабочими сопряженными мерами напряжения и деформации.

$$S = J F^{-1} \sigma F^{-T} \quad (24)$$

- называется вторым тензором напряжений Пиолы-Кирхгофа. Это симметричный тензор, энергия которого сопряжена с деформацией Грина-

Лагранжа. Первый и второй тензоры напряжений Пиолы-Кирхгофа связаны соотношением:

$$\mathbf{I} + \mathbf{P} = \mathbf{F}\mathbf{S} = (\mathbf{I} + \nabla\mathbf{u})\mathbf{S} \quad (25)$$

Эта формула позволяет переписать уравнение баланса импульса в следующем виде:

$$\rho_0 \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \mathbf{F}_V + \nabla_x * [(\mathbf{I} + \nabla\mathbf{u})\mathbf{S}], \quad (26)$$

где

$\rho_0$  – это начальная плотность вещества;

$\mathbf{u}$  - вектор смещения;

$\frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2}$  – ускорение вектора смещения, которое вместе с отношением вида:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(E), \quad (27)$$

где  $E$ - модуль упругости, даст замкнутую систему уравнений для вектора смещения.

## 6. ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Функцию Coil используется для моделирования катушек, кабелей и проводников, подверженных сосредоточенному возбуждению, например, приложенному извне току или напряжению. Функция Coil преобразует это сосредоточенное возбуждение в локальные величины (электрическое поле и плотность электрического тока) [4], [5].

Плотность тока:

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{ctr}}{A} \mathbf{e}_{coil}. \quad (28)$$

где

$N$  - число витков;

$I_{ctr}$  – сила тока в катушке;

$\mathbf{e}_{coil}$  – удельная электрическая проводимость катушки;

$A$  — поперечное сечение проводника, перпендикулярное направлению электрического тока.

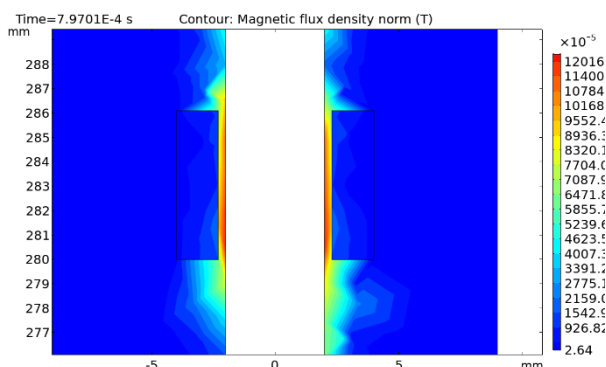


Рис. 5. Визуализация процесса возникновения магнитных полей в районе катушки считывания информационного сигнала, после возникновения крутильной волны

Информационный импульс (Рис. 6).

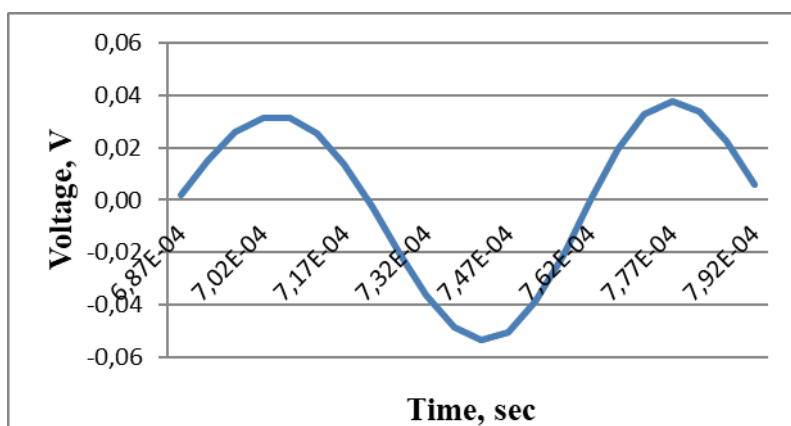


Рис. 6. Осциллограмма ЭДС информационного сигнала с катушки считывания, полученная с помощью математической модели МПП

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из модели, она адекватно описывает все процессы, происходящие в первичном МПП. Информационный сигнал (рисунок 6), зарегистрированный на катушке считывания, совпадает с экспериментальными данными (Рис. 2) с погрешностью не более 5%. Данная модель имеет возможность задать требуемые входные данные, что дает огромное подспорье в проектировании магнитоотрицательных датчиков. Представленная математическая модель имеет практическое применение в промышленном и научном развитии первичных магнитоотрицательных преобразователей перемещения. Данная математическая модель МПП является перспективной для использования разработчиками магнитоотрицательных датчиков, за счет удобства моделирования частных случаев. Разработанная модель выгодно



отличается от существующих тем, что имеет визуальный контроль любого участка первичного МПП в любой временной точке.

Резюмируя, можно выделить основные преимущества разработанной математической модели МПП в сравнении с известными:

- «полнота модели» включает в себя моделирование всех процессов;
- «целостность» - все этапы моделирования связаны между собой, любое изменение в какой-то части модели, влияет на всю модель;
- визуальный контроль любого участка модели в любой временной точке;
- простота использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясовеев В.Х., Исхаков Р.Р. Принципы построения магнитострикционных датчиков перемещения // Датчики и системы. 2001. №3. С. 53-60, 2001.
2. Шмелев А.А., Ясовеев В.Х. Интеллектуальный магнитострикционный датчик линейных перемещений // Датчики и системы. 2014. № 12. С. 12-15.
3. Шмелев А.А., Ясовеев В.Х. Интеллектуализация магнитострикционных датчиков перемещения // Вторая международная конференция «Интеллектуальные технологии обработки информации и управления». г. Уфа–2014. С. 151–154.
4. T. Okazaki, M. Tanaka, N. Okanisi et al., “Magnetostrictive properties of Fe-Ga/Ni bimorph layers,” *Materials Transactions*, vol. 48, no. 2, pp. 117-120, 2007.
5. A. A. Shmelev, V. Kh. Yasoveev [Mathematical model of magnetostrictive linear displacement transducer]. *Proc. International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, 2019, pp. 1-4.

*Королев И. А.<sup>1</sup>, Лухачёв И. В.<sup>1</sup>, Гелиев А. В.<sup>2</sup>, Овдиенко М. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГУП «Государственный научно - исследовательский институт авиационных систем»

<sup>2</sup>ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ 27 и 270 В**

*Аннотация:* В статье рассмотрена концепция реконфигурируемой бортовой аккумуляторной батареи с постоянным напряжением на номиналы 27 и 270 вольт. Проведено компьютерное моделирование электротепловой схемы в MATLAB. Приведена логика коммутации, реконфигурации и аварийного отключения АКБ.

*Ключевые слова:* аккумулятор, 270В, батарея.

## 1. Введение

В настоящее время на борту применяются источники постоянного тока номинальным напряжением 27 В [1]. При этом переход на повышенное напряжение, хотя и сулит определенные преимущества, затрудняется отсутствием полного охвата потребителями 270 В. Что, в свою очередь, делает бессмысленным создание источников 270 В. Для того, чтобы дать толчок переходу на повышенное напряжение, предлагается концепция реконфигурируемой батареи, способной отдавать энергию с номинальными напряжениями как 27 В, так и 270 В.

Также достоинством такого решения является то, что подзарядка реконфигурируемой батареи может осуществляться бортовыми 27 В, а отдавать энергию с номинальным напряжением 270 В, реконфигурация также позволит исключать из цепи питания электроэнергией элементы АКБ находящиеся в предаварийном состоянии.

В статье описан процесс разработки компьютерной модели для принятия оптимальных проектных решений на физическом уровне в целях повышения производительности на системном уровне и улучшения потребительских качеств бортовой реконфигурируемой аккумуляторной батареи на 27 В – 270 В

## 2. Методология и эксперименты

Разработка принципиальной электрической схемы была осуществлена в среде MATLAB Simulink. На рисунке 1 показан модуль, собранный из 9-и призматических ячеек литий-фосфатных аккумуляторов. За основу была взята ячейка EVE LiFePo4 EVE 30135185-50 [2], емкостью 50 А×ч и номинальным напряжением 3.2 В. Собранные последовательно 9 ячеек дают напряжение, близкое к  $3.2 \times 9 = 28.8$  В, что укладывается в 10%-й коридор допустимых значений. Выбор железо-фосфатных был обусловлен соображениями надежности, критичными для авиационных систем [3-5].

В Matlab Simulink был собран аналогичный электрический модуль из 9-и индивидуальных аккумуляторных ячеек, показанный на рисунке 2. Схемы различных частей АКБ представлены на рисунке 3. Также была разработана

тепловая модель аккумулятора на 28.8 В из 9-и индивидуальных аккумуляторных ячеек. Её схема представлена на рисунке 4.

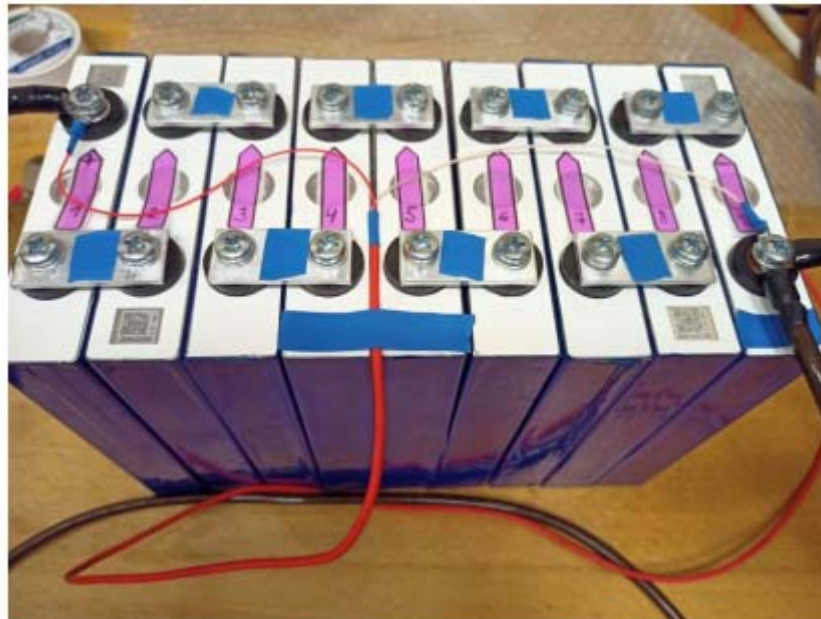


Рис. 1. Модуль из 9-й аккумуляторных ячеек

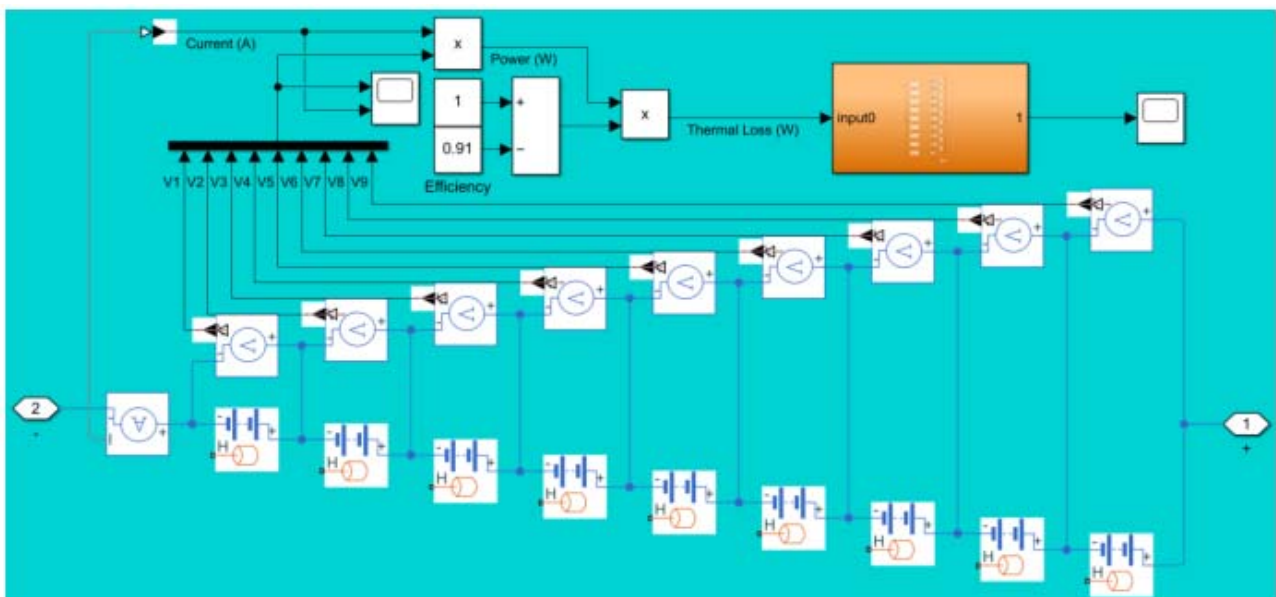
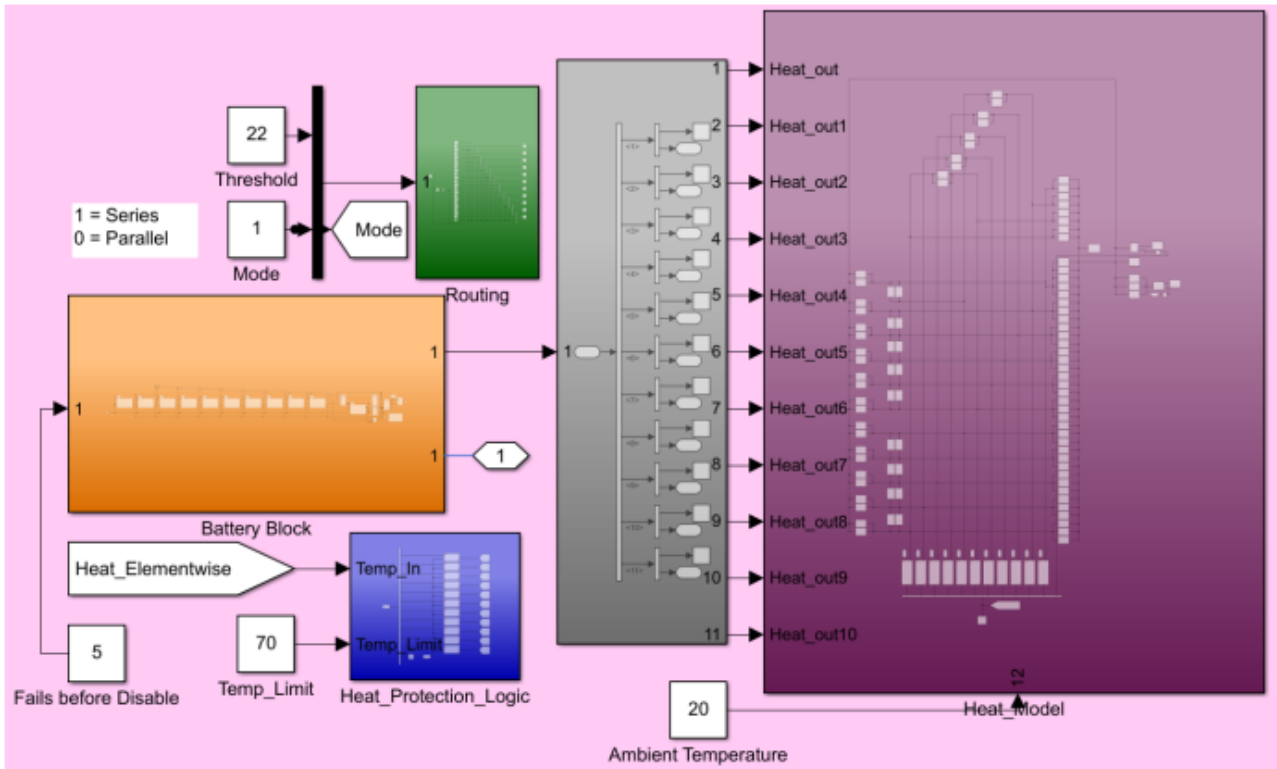
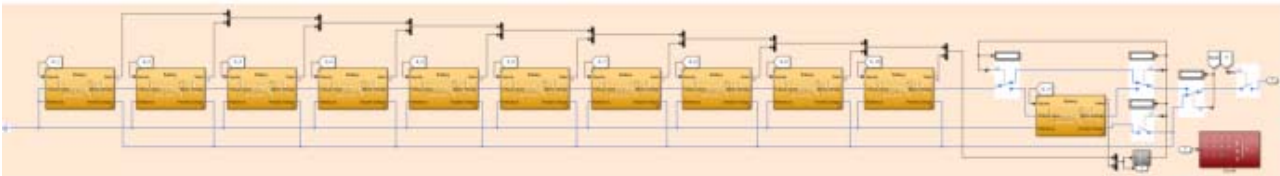


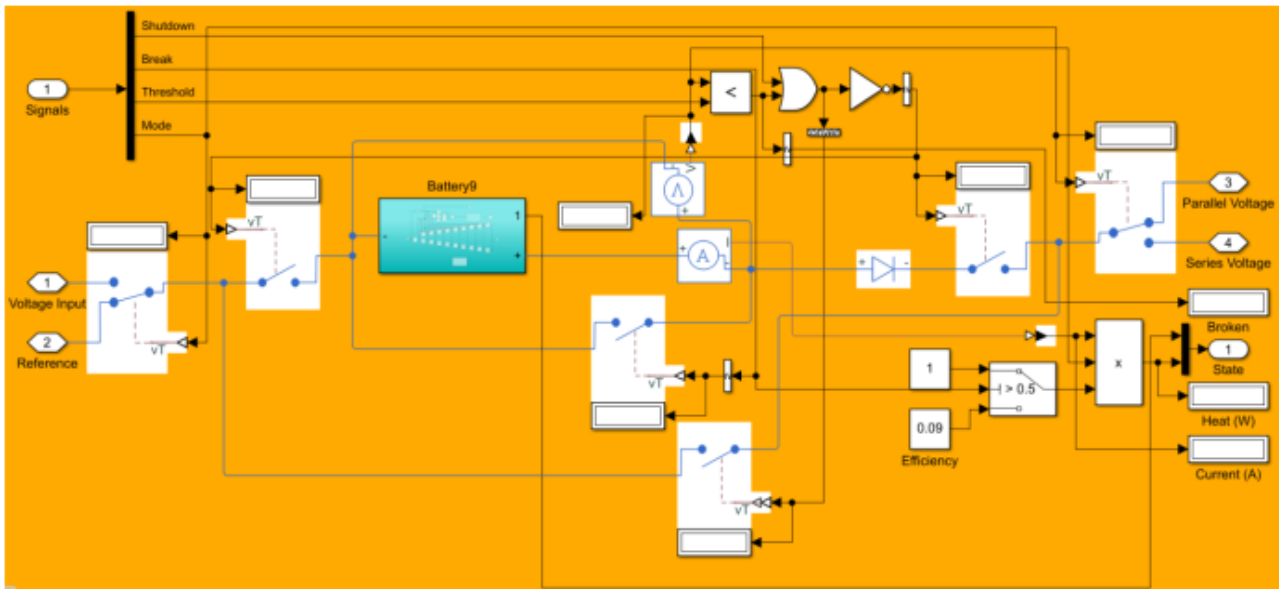
Рис. 2. Компьютерная модель модуля из 9-и ячеек в MATLAB Simulink



а



б



в

Рис. 3. а) Общая схема компьютерной модели; б) схема внешней коммутации модулей и присоединения резервного блока; в) схема и логика коммутации модуля из 9-и ячеек с общей АКБ.

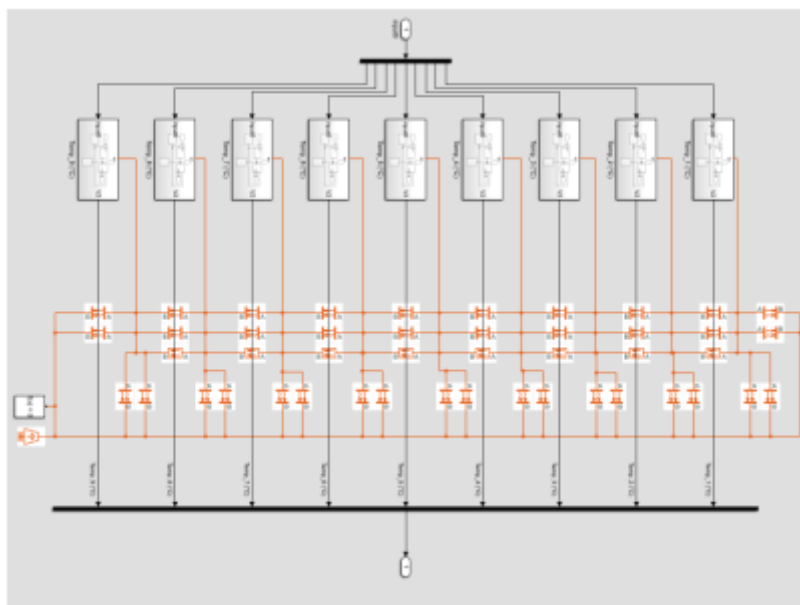


Рис. 4. Тепловая модель модуля из 9-и аккумуляторных ячеек

В модели собрана логика, обеспечивающая переключения между режимами 27 В и 270 В. Также обеспечен контроль напряжений модулей и их температур, позволяющих определять неисправный блок и отключать его от сети, заменяя резервным. Такой подход необходим для повышения надежности, так как сама реконфигурируемая батарея является значительно более сложной в исполнении, нежели обычные батареи, и её надежность резко снижается [6-8].

Стоит, однако, учитывать, что наличие потерь коммутационных элементах при последовательном соединении батарейных модулей на 28.8 не дает возможности получить 288 В на выходе. По результатам моделирования, требуется 11 модулей по 28.8 В, чтобы их последовательное соединение с предложенной схемой коммутации давало на выходе приемлемое напряжение.

### *Тепловая модель*

Существенным для формирования закона управления АКБ является тепловое поведение батареи. В целях решения данной задачи в MATLAB Simulink разработана модель, представленная тремя типами теплопередачи:

кондуктивным, конвективным и радиационным.

Для радиационной модели теплового переноса была разработана специальная схема подключения, позволяющая в 1D модели совместить преимущества скорости расчетов 1D модели и высокую точность 3D модели.

Конвективная модель представлена газовыми резервуарами, находящимися в непосредственном контакте со стенками ячеек. Каждый из резервуаров соединен с соседними по границе зоны перехода. Это обеспечивает передачу температуры и давления между областями, имитируя наличие течения газов. Несмотря на серьезное упрощение по сравнению с моделями, в которых решаются уравнения течения газов (уравнения Навье-Стокса), представленная модель рассчитывается на порядки быстрее.

Получившаяся тепловая модель, собранная в MATLAB Simulink, показана на рисунке 5.

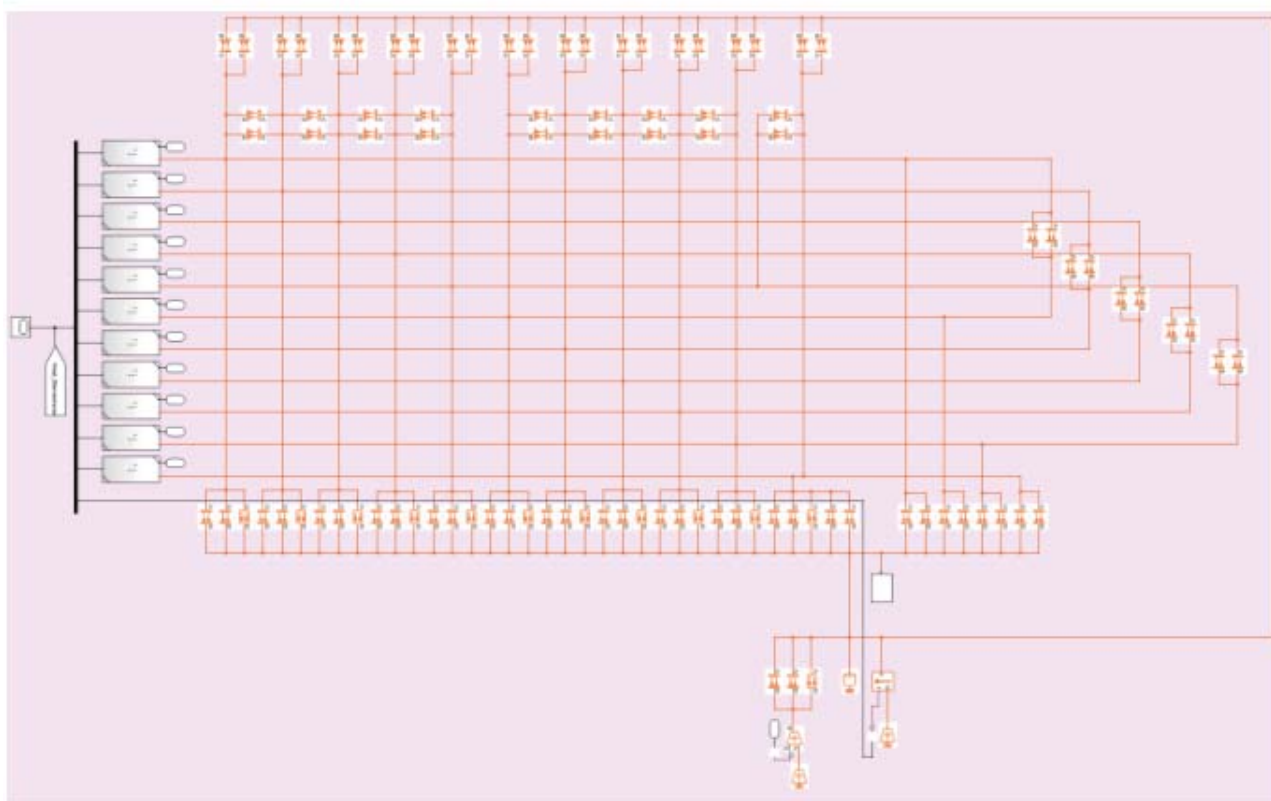


Рис. 5. Схема тепловой модели АКБ

### 3. Результаты

Снятые зарядные электрические характеристики с реальных ячеек представлены на рисунке 6. На основе экспериментальных данных по методикам, предложенным [9-11], выведена функциональная зависимость,

графическое отображение которой представлено на рисунке 7 и применена в разработанной компьютерной модели АКБ.

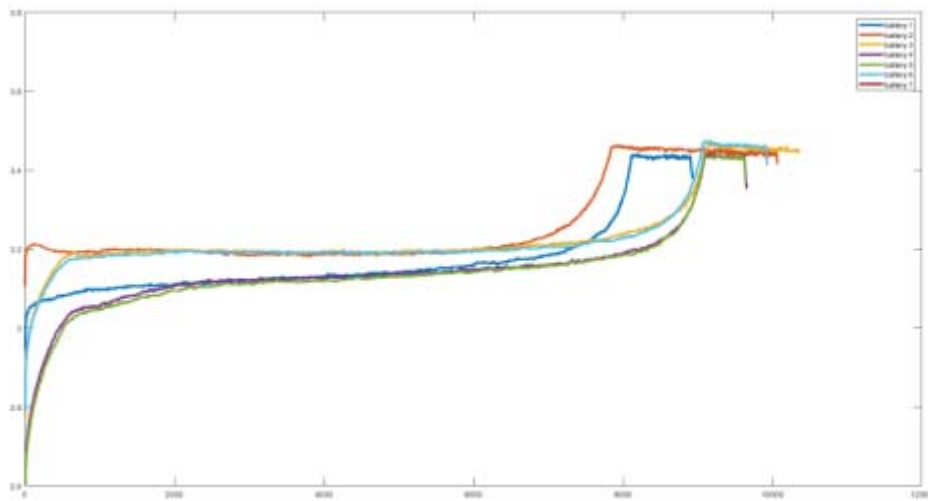


Рис. 6. Зарядные характеристики, полученные в экспериментах

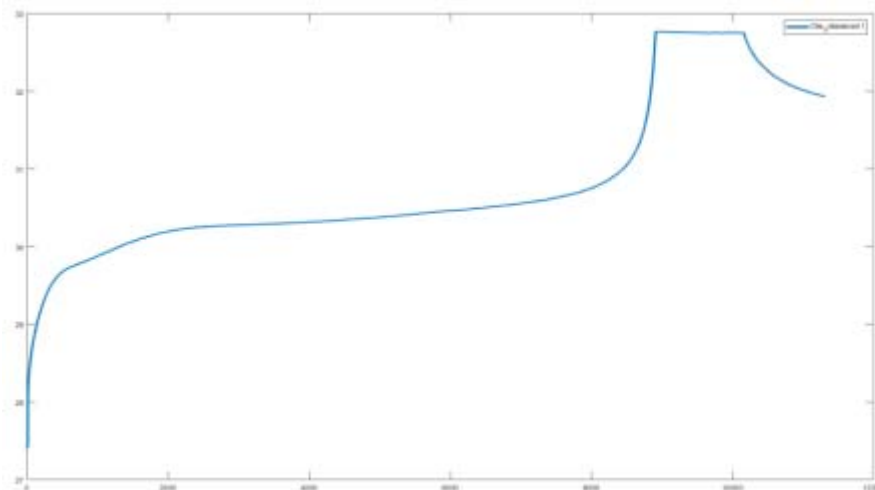
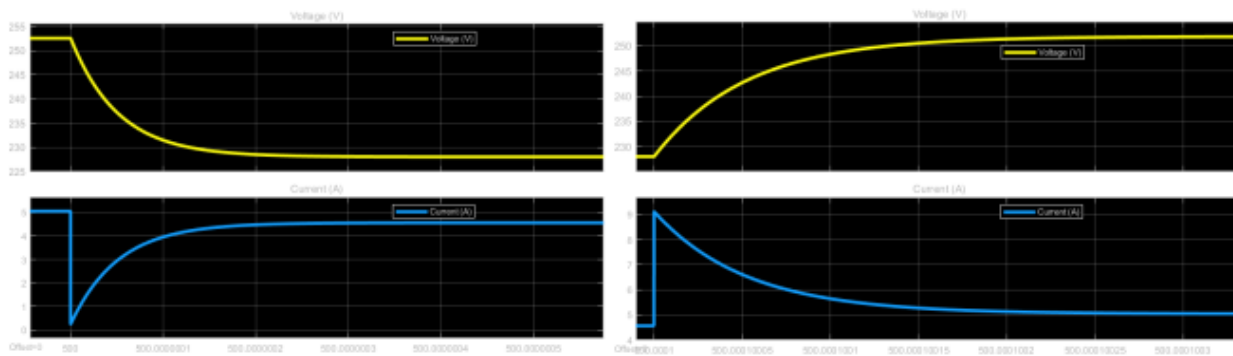


Рис. 7. Зарядная характеристика, заложенная в модель

Наибольший интерес в работе реконфигурируемой батареи представляют переходные процессы при подключении резервной батареи, взамен вышедшей из строя. Смоделированные переходные процессы показаны на рисунках 8 и 9.



а

б

Рис. 8. Переходные процессы при переключении отказавшей батареи на резервную:  
 а) — передний фронт, б) задний фронт

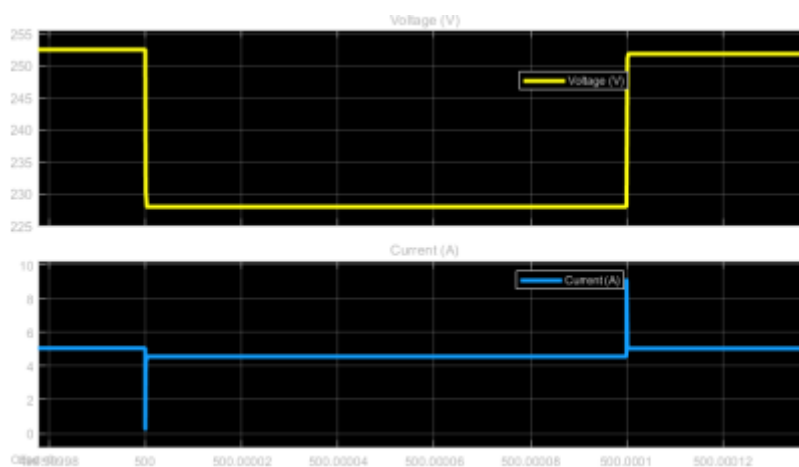


Рис. 9. Переходные процессы при переключении отказавшей батареи на резервную.  
 Общий вид.

Моделирование тепловых процессов для одного модуля из 9-и ячеек дает результаты, продемонстрированные на рисунке 10. Крайние элементы (1 и 9) нагреваются медленнее всего, затем идут смежные с ними (2 и 8), и так далее. Наибольшему нагреву подвержен центральный модуль. Исходя из этих результатов, можно рекомендовать располагать в центре модуля элементы АКБ с лучшими тепловыми характеристиками.



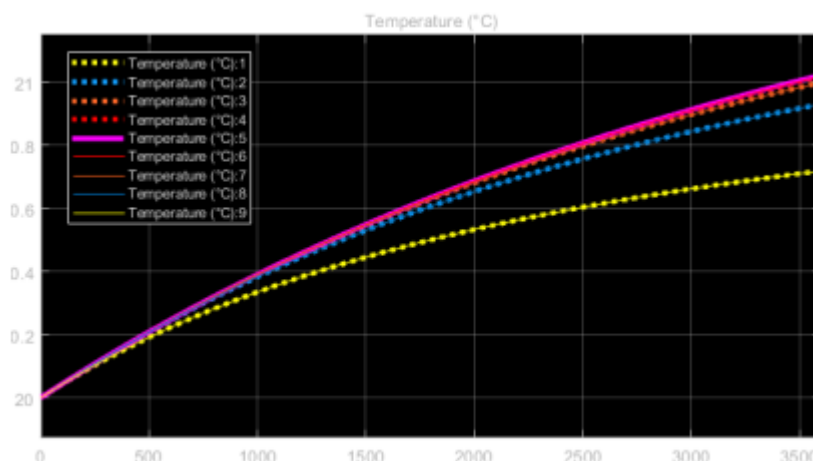


Рис. 10. Температуры различных ячеек в модуле из 9-и штук, от времени работы.

Также был смоделирован аварийный отказ со сгоранием одной ячейки. Аварийный модуль при этом исключается из электрической цепи, а работоспособность с прежним уровнем напряжений обеспечивает резервный модуль. При этом максимальные температуры остающихся подключенными модулей не превысили 60 °С (рисунок 11), что входит в допустимые границы эксплуатации АКБ.

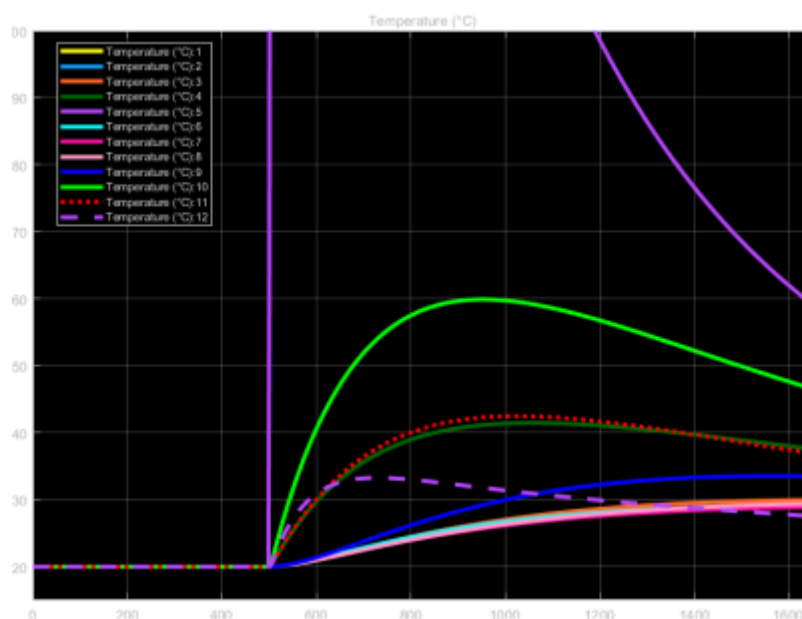


Рис. 11. Распределение максимальных температур в модулях АКБ при аварии

#### 4. Заключение

Приведенные данные позволяют использовать компьютерную модель для оценки перспектив использования бортовой реконфигурируемой аккумуляторной батареи на 27 В - 270 В. Закономерно, удельные

характеристики такой конфигурации оказываются хуже специализированных батарей под одно номинальное напряжение. Однако представленное решение позиционируется как универсальное.

Схема балансировки не является обязательной, работа всего модуля определяется емкостью самой плохой ячейки, остальные ячейки остаются недоиспользованными. Дegradация ячеек также определяется по цикличности самой низкoемкoстной ячейки. Таким образом, балансировка может осуществляться в такой системе лишь периодически, не влияя на эксплуатациoнные характеристики, главное — не допускать перезаряда/переразряда самых низкoемкoстных ячеек.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] ГОСТ Р 54073-2017
- [2] <https://neter.pro/lifepo4>
- [3] Lu, L.; Han, X.; Li, J.; Hua, J. and Ouyang, M. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *J. Power Sources* 2013, 226, 272–288.
- [4] Rahul Malik<sup>1</sup>, Aziz Abdellahi<sup>1</sup> and Gerbrand Ceder<sup>2,3,1A</sup> Critical Review of the Li Insertion Mechanisms in LiFePO<sub>4</sub> Electrodes 2013 The Electrochemical Society.
- [5] Методика расчета и выбора аккумуляторных батарей серий Classic GroE bClassicOSCM для применения в энергетике, М. 2005, с. 7.
- [6] Rauzy A. New Algorithms for Fault Tree Analysis - Reliability Engineering and System Safety. Vol. 40, 1993, pp. 203-211.
- [7] Makam S.V., Avizienis A.A. ARIES 81: A reliability and life-cycle evaluation tool for faulttolerant systems. – Proc. IEEE 12-th Fault Tolerant Computing Smposium, 1982 Jun, pp.267-274.
- [8] Викторова В.С. Агрегирование моделей анализа надежности и безопасности технических систем сложной структуры: Дис. докт. техн. наук. Москва. 2009. - 223 с
- [9] Doyle, Marc, Thomas F. Fuller, and John Newman. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell. *Journal of the Electrochemical Society* 140.6 (1993): 1526-1533.
- [10] Majeshwari A, Dumitrescu M A, Destro M, Samtarelli M, 2017, A Modeling Approach to Understand Charge Discharge Differences in Thermal Behavior in Lithium Iron Phosphate – Graphite Battery. *Electrochimia Acta* 243 129-141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2017.05.049>
- [11] Parmender Singh COMSOL Modelling for Li-ion Battery Diagnostics. Conference: COMSOL Conference Pune, In

*Юмалин Т. Т., Салихов Т. Р., Абдрахманов В. Х.*  
Башкирский государственный университет

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*Аннотация:* Рост количества промышленных помещений и их площадей требует более продвинутых систем мониторинга. Развитие органической электроники и интернет вещей может позволить создавать эффективные и легко масштабируемые системы контроля помещений.

В данной работе мы рассматриваем пример использования органических сенсоров для мониторинга среды внутри теплиц или птицефабрик. Так как все растения и насекомые испускают уникальные вещества возможно создание множества видов сенсоров, которые улавливают конкретные химические соединения, содержащиеся в окружающем воздухе.

Передача данных осуществляется беспроводным способом посредством технологий Wi-Fi или Bluetooth Mesh. Данные передаются на смартфон или сервер. Современные спецификации Bluetooth позволяют быстро разработать и развернуть сеть со множеством периферийных устройств, что не требует разработки собственных протоколов передачи данных.

Создание готового беспроводного аппаратно-программного комплекса значительно упростит процесс мониторинга различных промышленных и сельскохозяйственных помещений.

*Ключевые слова:* Органические сенсоры, интернет вещей, системы мониторинга.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время все больше набирают популярность системы мониторинга и удаленного управления. Подобная тенденция говорит о повсеместном внедрении средств автоматизации различных процессов. Существует уже множество решений и они, как правило, основываются на классической электронике [1].

Органическая электроника имеет ряд преимуществ перед классическими неорганическими материалами, они значительно легче, могут быть физически деформированы (гибкими), легко и дешево изготавливаются благодаря использованию полимеров. Функциональная гибкость таких устройств дает возможность подгонять их химическую структуру под требуемые свойства.

Благодаря тому, что создание органических электронных компонентов значительно быстрее и дешевле, это позволяет в больших масштабах производить небольшие устройства, такие как сенсоры [2-3]. Подобные сенсоры, имеют низкую себестоимость и способны покрыть большую площадь для мониторинга при минимальных затратах.

Для приема и передачи данных такой системы удобно использовать беспроводную связь. Ее значительно проще развернуть и настроить, а при использовании, например, во влажной среде, она является незаменимой в плане надежности. Подобную сеть можно развернуть посредством технологий Wi-Fi и Bluetooth Mesh, которые являются де-факто стандартом при создании устройств для интернета вещей. Более того, новая спецификация Bluetooth Low Energy имеет крайне низкое энергопотребление что является актуальным при построении полностью беспроводных систем [4].

## 1. ОРГАНИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ

В качестве сенсоров, которые можно использовать для мониторинга окружающей среды, предлагаются многослойные тонкопленочные структуры на основе органических соединений (рис. 1). Органические сенсоры трех типов: емкостные, резистивные и транзисторные отличаются низким энергопотреблением, так как могут работать без подогрева [5-6]. Предлагаемые сенсоры могут контролировать температуру и влажность воздуха, наличие концентрацию таких вредных веществ в атмосфере как пары аммиака, угарный газ, окислы азота, водород и метан [7-8]. Кроме того, использование органической электроники дает возможность создания специальных сенсоров, которые могут регистрировать определенные химические вещества, испускаемые растениями или насекомыми, это, в свою очередь, позволит тонко настроить систему под конкретные задачи [9].

Так же стоит обратить внимание на физические свойства органических материалов (маленькие размеры и вес, гибкость, пластичность) могут помочь найти совершенно нестандартные способы использования датчиков.

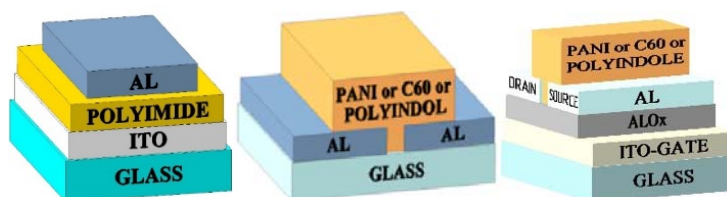


Рис. 1. Типы органических сенсоров: емкостной, резистивный и транзисторный

В качестве активного сенсорного слоя будут использованы тонкие пленки растворимых форм полианилинов, полииндолов, фуллеренов, РСВМ, а также полимерные композиты с углеродными нанотрубкам и оксидом графена (рис. 2). Пленки электродов из алюминия осаждаются термическим испарением в вакууме, полимерные слои формируются методом центрифугирования из раствора. Технология создания органических тонкопленочных структур оптимизирована с целью получения полупроводящих, однородных и равномерных по толщине слоев на основе ранее проведенных исследований по электрофизике полимерных пленок [10-14]. Основной целью улучшения технологии получения тонких пленок являлось увеличение подвижности носителей заряда.

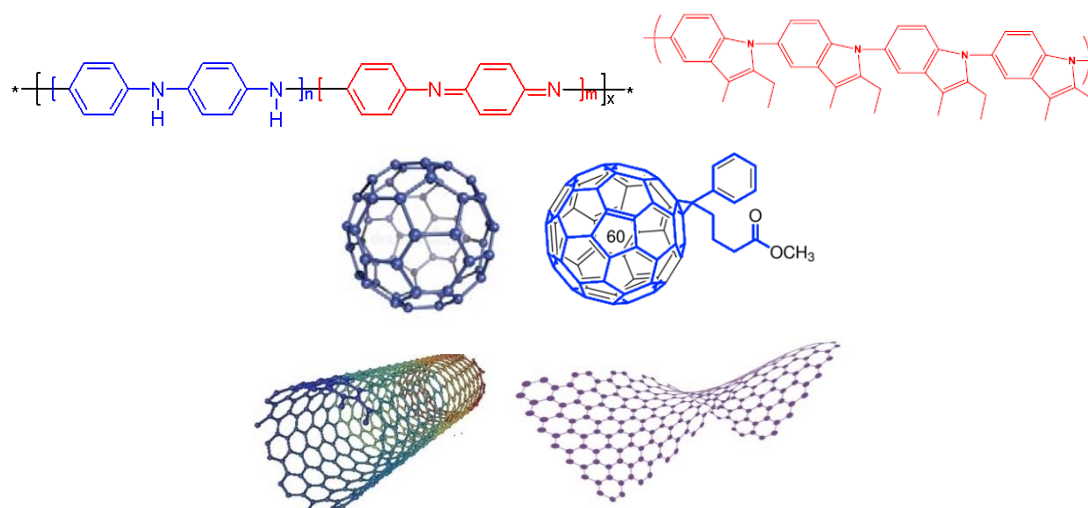


Рис. 2. Органические соединения: полианилин (PANI), полииндол, фуллерен, РСВМ, углеродная нанотрубка, оксид графена

С учетом изложенных выше технологий производства органических сенсоров, габаритные размеры сенсоров будут около 10x10x5 мм без учета корпуса и дополнительных элементов (коммуникационный модуль, блок питания).

Полученные сенсоры не требуют большого заряда батареи, стабильны при высокой влажности и способны распознавать присутствие всего нескольких десятков молекул, например, диоксида азота или этилмеркаптана, среди миллиардов молекул азота и кислорода, составляющих воздух.

Для согласования сигналов с сенсоров и микроконтроллера, можно использовать классическую схему усиления аналоговых сигналов с выходным напряжением 0-3 В, что соответствует диапазону входных напряжений АЦП микроконтроллера.

## 2. ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

В качестве способа передачи данных удобно использовать технологии Wi-Fi и Bluetooth Mesh. Обе технологии широко используются для создания устройств интернета вещей, концепция которого хорошо подходит для систем мониторинга [15-16].

На сегодняшний день существует множество микросхем реализующих передачу данных посредством обеих технологий, более того, существуют SoC имеющие обе технологии одновременно. Таковыми являются NRF52832, QCA4020, ESP32 и другие [17-19]. Производством подобных решений занимаются многие компании, такие как, Nordic Semiconductor, Espressif System, Qualcomm, Texas Instruments, STMicroelectronics, что позволяет выбрать решение в любой необходимой ценовой категории.

В данной статье мы будем ориентироваться на наиболее доступный модуль – ESP32-WROOM-32 (рис. 3). Модуль включает в себя 2-ядерный 32-битный микроконтроллер Tensilica Xtensa LX6 с 520 КБ ОЗУ. Поддерживаются стандарты Wi-Fi 802.11 b/g/n (2,4 ГГц) и Bluetooth версии 4.2 (Low Energy). Микроконтроллер имеет 15 контактов с АЦП, что дает возможность подключить к нему до 15 аналоговых датчиков, ограничений по подключению цифровых датчиков нет, так как общение с ними конфигурируется программно посредством цифровых входов.



Рис. 3. SoC ESP32-WROOM-32

При передаче данных энергопотребление увеличивается (до 240 мА при использовании Wi-Fi и до 100 мА при использовании Bluetooth), но так как передача значений датчиков происходит с использованием коротких пакетов с данными, а не в потоковом режиме, то энергоэффективность данной системы остается крайне высокой (рис. 4) [20]. Более того, передачу данных можно осуществлять только при обновлении значений на сенсорах, что значительно сократит энергопотребление.

Помимо этого, у микроконтроллера есть функция «сна» для экономии энергии, реализовать это помогают специальные методы, описанные в библиотеке. Устройства Bluetooth Low Energy и Wi-Fi в неактивном состоянии находятся в спящем режиме, что значительно снижает их энергопотребление.

Микроконтроллер в неактивном состоянии потребляет от 0.1 мкА до 50 мА, в зависимости от выставяемого режима питания и работы (рис. 4).

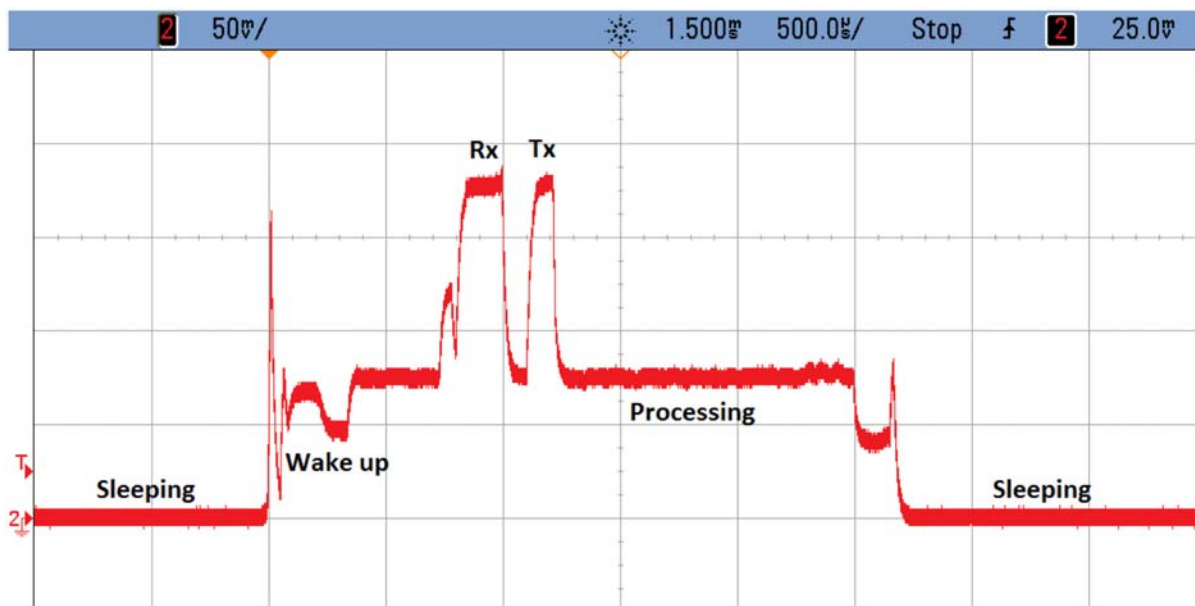


Рис. 4. Энергопотребление Bluetooth Low Energy во время одного события подключения

Рассчитаем средний ток за весь интервал подключения ( $I_a$ ) с учетом времени, в течение которого устройство находится в спящем режиме (1).

$$I_a = \frac{I_s(\tau - T) + T \cdot I_c}{\tau}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – интервал подключения,  $T$  – общее время работы,  $I_s$  – средний ток в спящем режиме,  $I_c$  – средний ток во время подключения.

Подставляя значения, соответствующие нашим условиям, получаем средний ток (2).

$$\frac{0.001 \text{ mA}(1000 \text{ ms} - 2.722 \text{ ms}) + 2.722 \text{ ms} \cdot 8.42 \text{ mA}}{1000 \text{ ms}} = 0.024 \text{ mA} \quad (2)$$

Если предположить, что емкость аккумулятора составляет 230 мАч (обычное значение емкости для плоской батареи CR2032), мы можем рассчитать ожидаемое время автономной работы (3).

$$t = \frac{Q}{I_a} = \frac{230 \text{ mAh}}{0.024 \text{ mA}} = 9583 \text{ ч} \quad (3)$$

В идеале можно ожидать, что батарея проработает 9583 часа, или примерно 400 дней, при непрерывной работе в подключенном состоянии с интервалом подключения в 1 секунду и нулевой задержкой ведомого



устройства. Эти расчеты показывают энергопотребление только для передачи данных, что является самой энергоемкой операцией. Очевидно, есть и другие факторы потребления энергии. Однако мы можем увидеть высокую энергоэффективность при использовании беспроводной передачи данных через Bluetooth Low Energy.

Для реализации передачи данных используются специальные библиотеки, написанные производителями микроконтроллеров. С их помощью мы можем управлять как низкоуровневой логикой радиомодулей (физический уровень), так и высокоуровневой (прикладной уровень). Это позволяет тонко настроить энергопотребление устройства.

Bluetooth Low Energy, в отличие от Wi-Fi, имеет технологию Bluetooth Mesh, которая позволяет строить сети в ячеистой топологии.

Так, например, используя технологию Bluetooth Mesh, можно с легкостью развернуть сеть типа One-to-Many (рис. 5). В данном сценарии присутствует единое серверное устройство и множество периферийных.

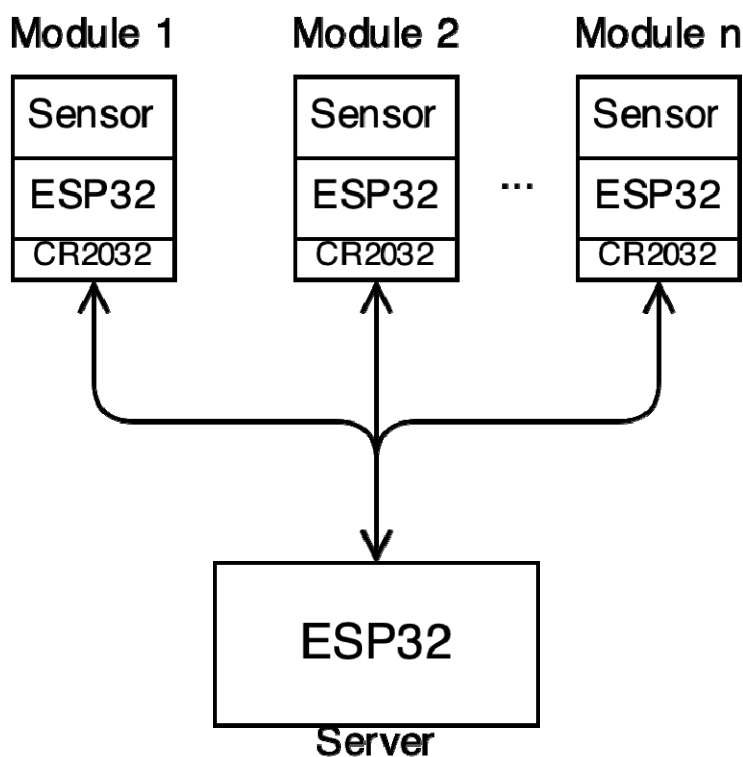


Рис.5. Блок-схема системы One-to-Many

Но наиболее интересна структура Many-to-Many (рис. 6). В данном случае сенсоры будут в качестве маячков, которые будут просто рассылать свои

данные по сети, а технология ретрансляции сообщений позволяет увеличить эффективную дальность передачи данных [21]. Таким образом, можно покрыть практически любую площадь необходимую для мониторинга.

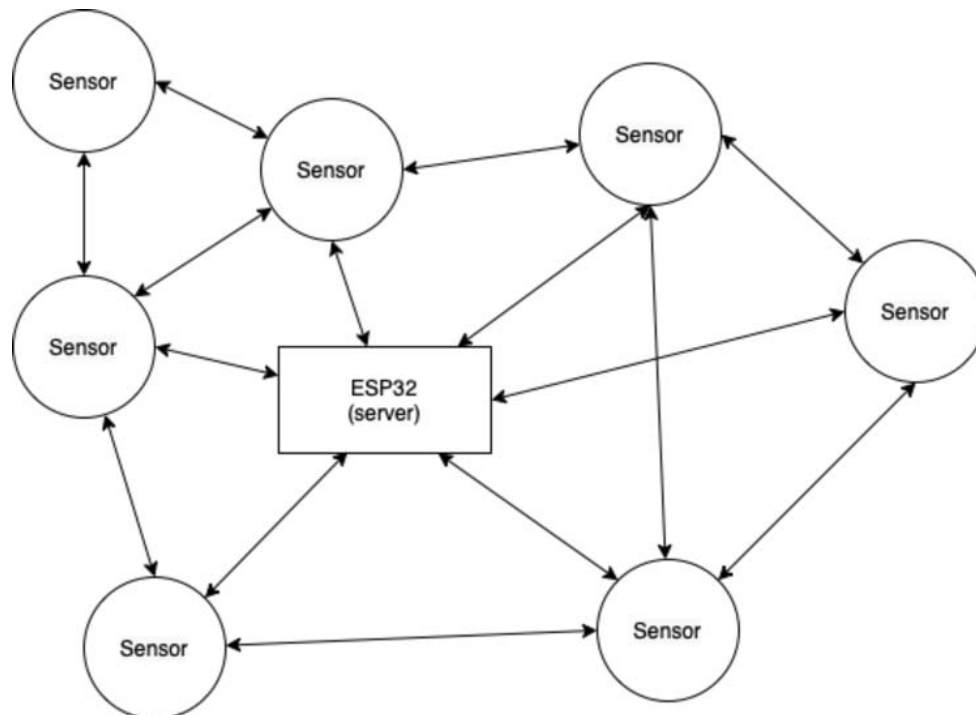


Рис. 6. Блок схема системы Many-to-Many

При выборе технологии Wi-Fi потребуется серверное устройство (роутер), которое будет являться точкой доступа для всех датчиков. Преимуществом использования данной технологии является возможность подключения к сети Интернет без посредников, что позволит получать данные из любой точки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование органических сенсоров может значительно удешевить и ускорить внедрение систем мониторинга. Органическую электронику значительно быстрее и доступнее произвести. Использование масштабируемых беспроводных систем передачи данных таких как Wi-Fi и Bluetooth позволяет быстро настроить прием-передачу между устройствами.

Как говорилось, органические сенсоры имеют низкое энергопотребление, что позволяет отказаться от использования проводного питания системы в

пользу обычных батареек, это, в свою очередь, значительно упрощает ее развертывание и расширение. Кроме того, использование подобной системы в теплицах и оранжереях предполагает наличие практически постоянного светового излучения, что дает возможность использовать это для зарядки датчиков.

Также преимуществами данной системы являются простота, совместимость с несколькими устройствами, а также низкие затраты на разработку и поддержку.

Подобную система хорошо подойдет как и для пользовательского использования, так и промышленного, так как она не требует специальных навыков и ресурсов для развертывания. Сенсоры, ввиду их маленького размера и отсутствия проводов, можно расположить абсолютно на любой поверхности в любом количестве, что покрывает нужды от обычной садовой теплицы до большой оранжереи или птицефабрики. Использование органических сенсоров не ограничивает нас мониторингом влажности, температуры и тд., а позволяет наблюдать за конкретными химическими соединениями, испускаемыми растениями или насекомыми. Так, например, можно моментально узнать о присутствии насекомых вредителей, так как растения в данном случае начинают испускать специальные химические соединения для предупреждения своих соседей или же мониторить содержание аммиака на птицефабрике. Таким образом, можно повысить эффективность и качество производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Salikhov, V. Abdrakhmanov, K. Vazhdaev, "System of monitoring and remote control of temperature conditions, climate and heat consumption.", 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE, vol. 3, 2016, pp. 171-174
2. H. Klauk. Organic electronics: materials, manufacturing, and applications. – John Wiley & Sons, 2006.
3. J. Shaw, P. Seidler, "Organic electronics: introduction", IBM Journal of Research and Development, vol. 45, 2001, pp. 3-9.
4. Bluetooth, S. I. G. "Sig introduces bluetooth low energy wireless technology, the next generation of bluetooth wireless technology.", December 2009.
5. L. Latypova, A. Andriianova, S. Salikhov, I. Mullagaliev, R. Salikhov, V. Abdrakhmanov, A. Mustafin, «Synthesis and physicochemical properties of poly[2-(2-chloro-1-methylbut-2-en-1-yl)aniline] obtained with various dopants», Polymer International, vol. 69(9), pp. 804–812, 2020

6. R. Salikhov, A. Yusupov, A. Lachinov, R. Rakhmееv, R. Gadiev, S. Salazkin «Chemical sensors based on nano-polymer films», *Measurement Techniques*, vol.52(4) , pp. 427-431, 2009.
7. J. Li. Carbon, “Nanotube sensors for gas and organic vapor detection”, *Nano letters*. vol.7(3), pp. 929-933, 2003.
8. S. Okur, «Identification of mint scents using a QCM based e-nose», *Chemosensors*, vol. 9(2), pp. 31, 2021.
9. A. Tameev, A. Vannikov, R. Rakhmееv, A. Lachinov, V. Nikitenko, R. Salikhov, A. Bunakov, “Effect of excessive pressure on the drift mobility of charge carriers in poly(diphenylene phthalide) films”, *Physics of the Solid State*, vol. 53(1), pp 195-200, 2011.
10. A. Kaushik, “Organic–inorganic hybrid nanocomposite-based gas sensors for environmental monitoring”, *Chemical reviews*. vol. 115(11), pp. 4571-4606. 2015.
11. F. Liao, C. Chen, V. Subramanian, “Organic TFTs as gas sensors for electronic nose applications”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol.107(2), pp 849-855, 2005
12. R. Salikhov, A. Bunakov, A. Lachinov, “Charge transfer in thin polymer films of polyarylenephthalides”, *Physics of the Solid State*, vol. 49(1), pp. 185- 188. 2007.
13. A. Bunakov, R. Salikhov, A. Lachinov “Current voltage characteristics of poly(diphenylenephthalide) thin films” *Technical Physics*. vol. 48(5). pp. 626-630, 2003.
14. R. Salikhov, A. Lachinov, R. Rakhmееv Electrical properties of heterostructure Si/poly (diphenylenephthalide)/Cu // *Journal of Applied Physics*, vol. 101(5), pp. 053706, 2007
15. A. Tuktarov, R. Salikhov, A. Khuzin, N. Popod'Ko N, I. Safargalin, I. Mullagaliev, U. Dzhemilev, «Photocontrolled organic field effect transistors based on the fullerene C60 and spiropyran hybrid molecule», *RSC Advances*, vol.9, pp.7505-7508, 2019.
16. A. Schütze, N. Helwig, T. Schneider, "Sensors 4.0—smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0.", *Journal of Sensors and Sensor systems*, vol. 7(1), pp. 359-371, 2018
17. K. Ashton "That «Internet of Things» Thing. In the real world, things matter more than ideas/K. Ashton", 2017
18. T.Yumalin, R.Salikhov, V.Abdrakhmanov «Experience of Using Bluetooth Low Energy to Develop a Sensor Data Exchange System Based on the NRF52832 Microcontroller 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)», pp. 229-233, 2021.
19. Semiconductor, Nordic. "nRF52832 Product Specification v1. 4." nRF52832 datasheet, 2017.
20. Qualcomm. “Qualcomm QCA4020 Product Development Kit”. QCA4020 development kit, 2018.
21. Espressif Systems. "ESP32-WROOM-32 Datasheet”, ESP32 series datasheet, 2021.
22. J. Lindh, C. Lee, M. Hernes. "Measuring bluetooth low energy power consumption." Application Note AN092, 2017.
23. K. Nair . «Optimizing power consumption in iot based wireless sensor networks using Bluetooth Low Energy», *International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*, pp. 589-593, 2015
24. M. Siekkinen. How low energy is bluetooth low energy comparative measurements with zigbee/802.15.4 //2012 IEEE wireless communications and networking conference workshops (WCNCW), pp. 232-237, 2012.
25. M. Baert. «The Bluetooth mesh standard: An overview and experimental evaluation”, *Sensors*. vol.18(8), pp. 2409. 2018.
26. R. Rondón. «Understanding the performance of Bluetooth mesh: reliability, delay, and scalability analysis» *IEEE Internet of Things Journal*. vol. 7(3) pp. 2089-2101, 2019.

*Мулькаманов Э. Р., Саттаров Р. Р.*

Уфимский государственный авиационный технический университет»

## **АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ TESLA ДЛЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ TESLA BATTERIES FOR POWER SYSTEM**

*Аннотация:* В статье рассматривается применение аккумуляторных батарей в энергосистеме на примере решений от компании Tesla Energy. Рассматриваются два типа батарей Tesla Powerpack и Tesla Megapack, их основные характеристики. На основе опубликованной информации произведен расчет удельных и выходных характеристик.

*Ключевые слова:* *Тесла, megapack, powerpack, аккумуляторы. Tesla, megapack, powerpack, battery.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Аккумуляторные батареи это один из видов накопителей, накопители необходимы для энергосистемы по многим факторам [1]. Для снижение пикового спроса, что ведет к улучшению энергосистемы в целом и уменьшает стоимость электроэнергии. Резервное хранилище, возможно применение как на станции для поддержки отдачи мощности, так и для предприятия, чтобы в случае сбоя было доступно резервное питание. Также накопители помогут вводу возобновляемых источников энергии, например, ветряных турбин [2] и микросетей. На самом деле каждый из этих пунктов содержит в себе много дополнительных полезных качеств. Данная статья посвящена одним из самых популярных аккумуляторным батареям от передовой компании Tesla.

Компания Tesla создает множество разных продуктов, которые улучшают мир вокруг нас. В данной статье мы рассмотрим продукцию от Tesla Energy, являющейся дочерней компанией Tesla Inc.

Tesla Powerpack и Tesla Megapack - это крупномасштабные перезаряжаемые аккумуляторы энергии, предназначенные для использования на предприятиях или в электроэнергетической компании, они построены на литий-ионном принципе работы, которые сейчас заполняют рынок поскольку одни из лучших вариантов батарей [3].

## 1. TESLA POWERPACK

Тесла Powerpack является перезаряжаемым литий-ионный аккумулятором, предназначенный для использования предприятиями или на небольших проектах. Powerpack способен хранить электроэнергию до 210 киловатт-часа для переключения нагрузки на время использования, резервного питания, реагирования на спрос, микросетей, интеграции возобновляемых источников энергии, регулирования частоты и контроля напряжения.

Каждый Powerpack содержит 16 батарейных блоков. Он сконструирован таким образом, что позволяют легко менять местами блоки.



*Рис. 1. Tesla Powerpack [4]*

Powerpack имел несколько версий, первая была 100 кВтч и её оценивали в 445 долларов за кВтч. Второе поколение имеет такие же размеры, но мощностью 200 кВт\*ч, а также улучшение второго поколения 210 кВт\*ч. Их стоимость оценивали в 398 долларов/кВтч. Другие технические характеристики указаны в таблице 1.

Характеристики Tesla Powerpack [5]

Модель	Вид аккумулятора	Емкость, кВт*ч	Рабочая температура	Габаритные размеры, м дл/шир/высота	Эффективность, туда-обратно	Масшт. мощность, кВА
Tesla Powerpack	Литий-ионный	210 (АС)	От -30 °С до 50 °С	Блок питания: 1,32/1/2,19 Вес - 2199 кг Инвертор: 1,04/1,39/2,2 Вес - 1120 кг	88% (2 часа) 89,5 (4 часа)	От 70 до 700 (при 480 В)

## 2. TESLA MEGAPACK

Тесла Мегараск является новым поколением аккумуляторных батарей, который заменяет старый Powerpack, сохраняет его все преимущества и может выполнять те же функции. Он аналогично построен на литий-ионной основе, его предназначение — это использование непосредственно на накопительных электростанциях. Он способен хранить до 3 МВт\*ч. В настоящий момент строятся много крупных электростанций для использования в основном с солнечными электростанциями.



Рис. 2. Tesla Megapack строение внутри [5]

Вопрос об экологичности литиевых аккумуляторов стоит одним из главных с заполнения рынка электромобилей. На данный момент Tesla

способна восстанавливать до 92% из отработавших аккумуляторов и сейчас все. Tesla предоставляет 15-летнюю гарантию отсутствия дефектов и накопления энергии. Также можно докупить 20-летнюю гарантию. И по истечению срока Tesla берет на себя переработку блоков.

Новое поколение занимает на 40% меньше места. Его размеры указаны в таблице 2. Существует множество различных вариантов расположения. Каждый вариант должен обеспечивать свободный доступ к любой аппаратуре для её ремонта или замены. Также так как это электрический элемент, то он требует повышенной безопасности для человека. И нужно учесть вероятность аварии, так как аккумуляторные блоки имеют свойство воспламеняться и взрываться, то они не должны вводить за собой глобальные потери.

В связи с этим расположение должно быть в следующем виде: для уменьшения пространства два блока должны стоять друг другу задними стенками, через передние осуществляется доступ к каждой ячейки. Перед каждым блоком должно быть место для прохода между рядами и безопасности людей, примем расстояние 2 метра или 1 метр от каждого блока. Таким образом, мы имеем в ширину 2,6 метра. Рассмотрим вариант расположение, указанный на рисунке 6.



Рис. 3. Расположение блоков Tesla Megapack [5]

$$S = 2(a + b + 2) \times b = 2 \times (1,6 + 7,14 + 2) \times (1,6 + 7,14 + 1) = 209,21 \text{ м}^3$$

Для одного блока

$$s = \frac{S}{3} = \frac{209,21}{3} = 70 \text{ м}^3$$



Также рассмотрим второй вариант схемы, изображенный на рисунке 7.

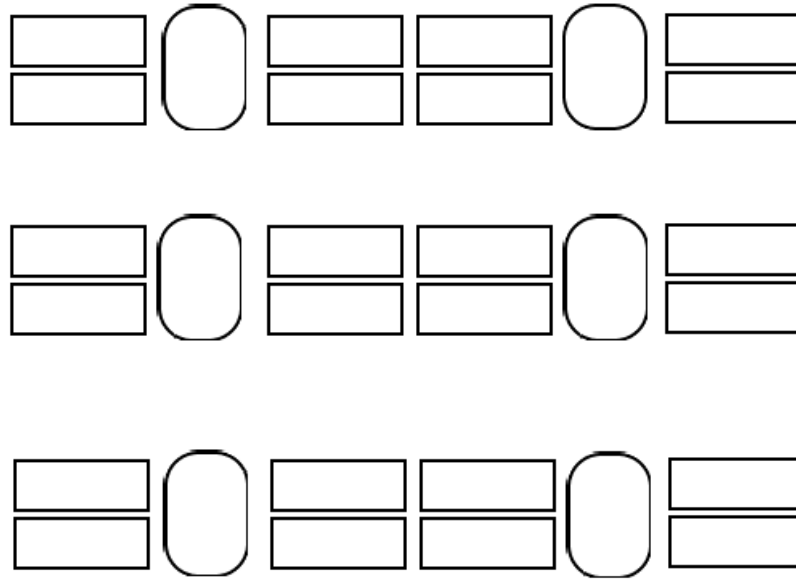


Рис. 4. Расположение блоков Tesla Megapack

$$S = (1,6 \times 6 + 6) \times (7,14 \times 4 + 4) = 735,85 \text{ м}^3$$

На один блок

$$S = \frac{S}{24} = 30,66 \text{ м}^3$$

Данное расположение занимает в два раза меньше места.

Удельная мощность по занимаемой площади и объему

Рассмотрим второй вариант, так как он наиболее экономичный в этом плане. Мощность одного блока равна 3 МВт, мощность всех станции примем  $3 \times N$ , где  $N$  – количество блоков.

Удельная мощность для единичного блока:

$$W_{уд} = \frac{P}{V} = \frac{3}{7,14 \times 1,6 \times 2,2} = 119,366 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$$

Удельная мощность станции с учетом необходимого места и оборудования:

$$W_{уд} = \frac{P}{V} = \frac{72 \text{ МВт}}{735,85 \times 2,2} = 44,5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$$

Илон Маск заявил, что Tesla Megapack продается по цене <200 долларов / кВтч, или ~ 300 долларов / кВтч с включенной силовой электроникой и обслуживанием. Что значительно меньше первой версии

Характеристики Tesla Megapack [7]

Модель	Вид аккумулятора	Емкость, МВт*ч	Рабочая температура	Габаритные размеры, м дл/шир/высота	Масшт. Мощность, МВА
Tesla Powerpack	Литий-ионный	3	От -30 °С до 50 °С	Блок питания: 7,14/1,6 Вес – 23,1 тонны	до 1,54

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Tesla Megapack во многом превосходит Powerpack. Он имеет относительно большую мощность, занимает малый объем. Но также он обладает рядом недостатков присущие аккумуляторам, такие как, срок службы 15 лет невелик относительно других видов накопителей, их зависимость от окружающей среды и т.д. Многие недостатки отсутствуют у других видов накопителей, например, твердотельными накопителями или системой Vehicle-To-Grid.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.П. Степаненко // Выбор накопителей в изолированных энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии // УДК 620.92 - 2017
2. Design of wind turbine torque controller with second-order integral sliding mode based on VGWO algorithm // Ma L., Xiao L., Huang X., Sattarov R.R. // Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2021. Т. 38. № 2. С. 259-270.
3. Д.В Агафонов, А.Ф. Эрк // Выбор химического источника тока для буферной батареи возобновляемых источников энергии //УДК 631.152 – 2018
4. <https://www.tesla.com/powerpack>
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Powerpack](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Powerpack)
6. <https://www.tesla.com/megapack?redirect=no>
7. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Megapack](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Megapack)

*Ковалев К. Л., Колчанова И. П., Полтавец В. Н.*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

## **КИНЕТИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

*Аннотация:* Растущий спрос на непрерывное и экологически чистое электроснабжение с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), бесперебойное энергоснабжение ответственных потребителей и увеличение использования накопителей в коммерческом и коммунальном секторах является основным фактором, стимулирующим рост рынка систем аккумулирования энергии. Благодаря уникальным преимуществам, таким как длительный срок службы, высокая удельная мощность, минимальное воздействие на окружающую среду, быстрая реакция и стабильность напряжения, маховичная система накопления энергии в последнее время привлекает внимание. В статье приведен обзор зарубежных разработок кинетических накопителей энергии, используемых в автономных энергетических системах с ВИЭ. Описаны конструкции КНЭ с магнитным ВТСП подвесом, которые были созданы в МАИ.

*Ключевые слова:* кинетический накопитель энергии, возобновляемые источники энергии, гибридные системы накопления энергии, высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП), ВТСП подвес.

### **ВВЕДЕНИЕ**

За последнее время в мире доля альтернативной генерации, использующая энергию ветра и солнца, значительно выросла. Как отмечают эксперты Bloomberg NEF, по итогам 2020 года в мире совокупно в строй было введено свыше 200 ГВт новых мощностей. Так, солнечная энергетика за год прибавила более 130 ГВт, а ветроэнергетика более 70 ГВт (64,8 ГВт ветроэнергетических мощностей на суше и 6,5 ГВт – на море) [1].

Обладая такими достоинствами как доступность и неисчерпаемость источника энергии в условиях постоянного роста цен на традиционные виды энергоносителей, а также экологической безопасностью для окружающей среды, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) имеют ряд недостатков. Основным недостатком применения ВИЭ является их зависимость от климатических условий на протяжении года, что, в свою очередь, ведет к слабой прогнозируемости объема выработанной ими энергии, а также высокой волатильности при выработке самой энергии. Для обеспечения стабильных параметров электрического напряжения и частоты в сети широко используются аккумуляторные батареи (АБ). В последние годы особый интерес среди

накопителей энергии, предлагающихся для использования с ВИЭ, представляют кинетические накопители энергии (КНЭ). Система аккумулирования энергии с использованием КНЭ имеет некоторые явные преимущества перед химическими батареями, такие как, способность работать при экстремально низких температурах, более длительный срок службы, высокая удельная мощность и высокая удельная плотность запасенной энергии (см. таблицу 1). Кроме того, зарядка и разрядка маховика несут чрезвычайно незначительные потери (2%), благодаря чему электрическая система хранения достигает КПД около 97,0%. Срок жизни КНЭ практически не зависит от глубины разряда. Маховичные системы могут работать одинаково хорошо как на частые неглубокие разряды, так и на очень глубокие разряды. Этот тип изменения нагрузки, как правило, является сложным для АБ, поскольку сочетание низких и высоких нагрузок делает их конструкцию трудной для оптимизации. К достоинствам КНЭ также можно отнести высокую способность к циклированию, масштабируемость и модульность [2].

Таблица 1

Сравнительные характеристики накопителей

Тип накопителя	Аккумуляторные батареи			КНЭ
	Кислотные <i>GEL</i>	Щелочные <i>NiCd</i>	<i>Li-ion</i>	
Показатели				
Уд. Мощность, Вт/кг	30...90	150...300	150...315	400...1600
Ресурс, циклов	100...400	1000...2000	500...2500	10 <sup>7</sup>
Срок службы, лет	2...10	10...15	5...10	>20
КПД, %	70...85	65...80	80...95	96...98

## 1. ПРИМЕНЕНИЕ КНЭ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С ВИЭ

За рубежом КНЭ в энергосистемах применяют уже давно. Это прежде всего использование накопителей энергии в сетевых компаниях, что позволяет сглаживать пики потребления и нагрузки, регулировать частоту и напряжение, снижать потери при передаче и регулировании реактивной мощности. Наиболее известны разработки компании Beacon Power. Это введенные в эксплуатацию компанией регулирующие заводы мощностью 0,5 МВт (Tyngsboro, MA), 20 МВт (Stephentown, NY) и 20 МВт (Hazle, PA) [3,4].

Применение накопителей энергии в энергосистемах с ВИЭ позволяет: выравнять переменные графики работы; снизить колебания мощности; обеспечить требуемое качество электроэнергии; обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей. В 2003 году японской компанией Fuji Electric на ВЭС острова Дого в Японии было установлено 200 маховиков Urengo общей мощностью 1800 кВт. Использование КНЭ помогло уменьшить колебания в системе, позволило дизель-генераторной установке (ДГУ) работать с большей эффективностью, что привело к значительной экономии дизельного топлива [5]. Среди разработок КНЭ, применяемых с ВИЭ, следует отметить разработку Enel и Amber Kinetics супермаховика модели M32 энергоемкостью 32 кВт·ч (115,2 МДж), который способен выдавать 8 кВт мощности в течение 4 часов [6]. Весной 2018 года Hawaiian Electric в сотрудничестве с Amber Kinetics начали тестирование КНЭ M32 на генерирующей станции Campbell Industrial Park на Гавайском острове Оаху с целью интеграции ВИЭ в сеть [7].

КНЭ успешно применяются в микросетях (MicroGrid) для стабилизации работы сети с ВИЭ. Лидирующие позиции в этом направлении занимает компания ABB, которая производит стабилизаторы сети PowerStore трех номиналов — 500, 1000 и 1500 кВт. В состав PowerStore, который является элементом системы MicroGrid Plus, входят: КНЭ, инверторы и специальное программное обеспечение (виртуальный генератор). Время реакции такой системы составляет менее чем 150 мс, а перегрузочная способность — до 10 номинальных мощностей. В качестве накопителя PowerStore используется КНЭ технологии Piller энергоемкостью 5 кВт·ч и частотой вращения маховика 3600 мин<sup>-1</sup> [8]. Среди реализованных проектных решений ABB MicroGrid Plus следует отметить следующие [9]:

- Проект Rottnest Island (Западная Австралия, 2004 г), ВЭУ с ДГУ;
- Проект Ross Island (Ross Island, 2009 г), ВЭУ с ДГУ;
- Проект Laing O'Rourke (Отдаленный Квинсленд, 2015 г), ФЭУ с ДГУ;
- Проект Kalbarri (Западная Австралия, 2008 г), ВЭУ;
- Проекты Lanzarote и La Gomera (Канарские острова, 2014 г);

– Проект Marsabit (Кения, 2016 г), ВЭУ с ДГУ.

Преимущества применения PowerStores для клиентов: обеспечивают интеграцию возобновляемых источников энергии в сети; минимальное потребление дизельного топлива; надежное и стабильное электроснабжение.

## 2. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ КНЭ

В связи с прогрессом и доступностью технологии сверхпроводниковых пассивных магнитных подшипников в последнее время были созданы ряд КНЭ, использующих магнитные ВТСП подшипники. Магнитные ВТСП подшипники это простая бесконтактная пассивная система с рабочим ресурсом  $> 20$  лет, с высокой скоростью ( $> 50\,000$  мин<sup>-1</sup>) и низкими потерями на трение. Обладает регулируемой жесткостью и демпфированием. ВТСП подшипники имеют ряд преимуществ перед магнитными подшипниками (отсутствие сложной системы энергопитания и автоматического управления, более длительное время развития отказа). Лидирующие позиции в этом направлении занимает компания Boeing. В 2001-2003 годах Boeing изготовила и испытала два прототипа КНЭ на 3 кВт/10 кВт·ч и на 100 кВт/5 кВт·ч. В 2006 г. Boeing провела испытания КНЭ максимальной емкостью 125 МДж (35 кВт·ч), а в 2010 г. компания представила в качестве готового к заказу прототип КНЭ 5 кВт·ч/3 кВт [10]. В Японии NEDO разработали КНЭ мощностью 10 кВт ч/100 кВт [11]. В Германии ATZ и L-3 Magnet-Motor (ММ) был разработан КНЭ с запасаемой энергией 20 МДж (5,5 кВт·ч) и мощностью 250 кВт [12,13].

В 2015 г. в Японии Railway Technical Research Institute (RTRI) совместно с Furukawa Electric и Kubotek был создан самый большой сверхпроводниковый КНЭ с запасаемой энергией 360 МДж (100 кВт·ч) и мощностью 300 кВт. Подвес ротора маховика (4 тонны) осуществляется сверхпроводящим магнитным подшипником, изготовленным Chubu Electric с использованием ВТСП-2 ленты и ВТСП пластин из YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>. КНЭ планировалось использовать для выравнивания мощности генерируемой солнечной электростанцией мегаватного класса в местечке Кокекураяма (префектура Яманаси) [14].

В России также ведутся работы по созданию сверхпроводниковых КНЭ. В 2010 году МАИ совместно с НИИЭМ была создана модель КНЭ с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией 0,5 МДж (рис. 1). Стальной маховик накопителя весом порядка 100 кг, раскручиваясь до скорости 6000 мин<sup>-1</sup>, способен в режиме разрядки выдать мощность 10 кВт в течение 25 секунд. В таблице 2 представлены основные параметры КНЭ с запасаемой энергией 0,5 МДж [15].

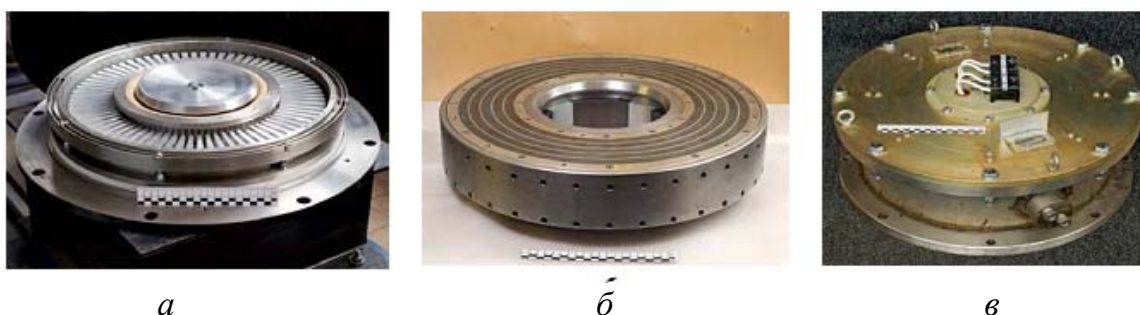


Рис. 1. КНЭ с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией 0,5 МДж и его основные элементы:

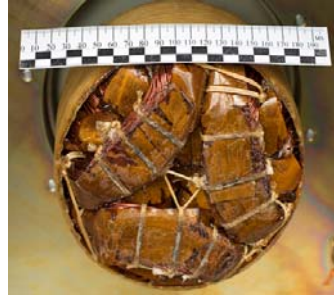
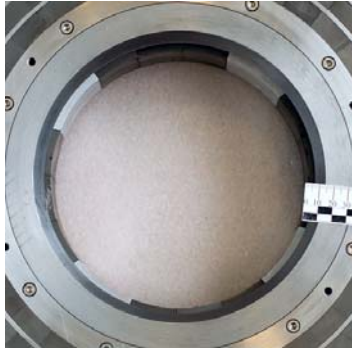
*а – криостат; б - маховик с чередующимися кольцевыми рядами постоянных магнитов NdFeB; в - кинетический накопитель в сборе*

Таблица 2

Основные параметры модели КНЭ с магнитным ВТСП подвесом

Наименование параметра	Значение
Запасаемая энергия, МДж	0,5
Выходная мощность, кВт	10
Диапазон выходного напряжения, В	220-240
Частота выходного напряжения, Гц	50
Время заряда, с	300
Время разряда, с	25
Максимальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	6000

В качестве мотор-генератора используется специально спроектированная в МАИ синхронная 4-х полюсная электрическая машина с постоянными магнитами из РЗМ на основе NdFeB с радиально-тангенциальной намагниченностью и безжелезным 3-х фазным статором. Мощность мотор-генератора 11 кВт. На рис. 2 представлены основные элементы мотор-генератора.



*а*

*б*

*Рис. 2. Основные элементы мотор-генератора:  
а - ротор с ПМ из NdFeB, закрепленными на маховике КНЭ; б – неподвижный  
безжелезный статор с 3-х фазной обмоткой*

В 2015 году МАИ совместно с МГТУ им. Баумана, АО «Горизонт», АО «ВПО «Точмаш», «Центротех-СПб» и АО «НИИЭМ» создали и испытали КНЭ с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией свыше 5 МДж. Эта работа проводилась в рамках реализации проекта Госкорпорации «Атомная энергетика Росатома» «Инновационная энергетика/Сверхпроводниковая индустрия» (2011–2015 годы) [2,16]. В таблице 3 приведены основные параметры КНЭ с запасаемой энергией свыше 5 МДж.

Основными элементами конструкции КНЭ являются: маховик, мотор-генератор, магнитные ВТСП подвесы верхний и нижний, магнитная опора на постоянных магнитах (ПМ) и опора нижняя подвижная. Вращающийся узел КНЭ поддерживается системой левитации, состоящей из магнитной опоры и двух цилиндрических магнитных ВТСП подвесов, находящихся в верхней и нижней частях вала маховика. Магнитная опора удерживает маховик в осевом направлении, а магнитные ВТСП подвесы обеспечивают радиальную устойчивость и частичную компенсацию веса маховика. Магнитная опора выполнена на основе встречно намагниченных конических кольцевых постоянных магнитов (ПМ) трапецеидального сечения на основе NdFeB.



Основные параметры КНЭ с магнитным ВТСП подвесом

Наименование параметра	Значение
Запасаемая энергия, МДж	5
Выходная мощность, кВт	100
Частота питающего напряжения, Гц	300-400
Диапазон выходного напряжения, В	150-350
Частота выходного напряжения, Гц	50
Время заряда, с	300
Время разряда, с	50
Максимальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	8000

На рис. 3 представлена фотография опытного образца КНЭ во время стендовых испытаний. При разработке конструкции маховика (см. рис. 4) предпочтение было отдано многослойной конструкции (диск из алюминиевого сплава Д16, труба из нержавеющей стали и бандаж из углеволокна). Такие маховики более надежны и безопасны в эксплуатации, чем цельнометаллические маховики.



Рис. 3. КНЭ с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией свыше 5 МДж во время стендовых испытаний

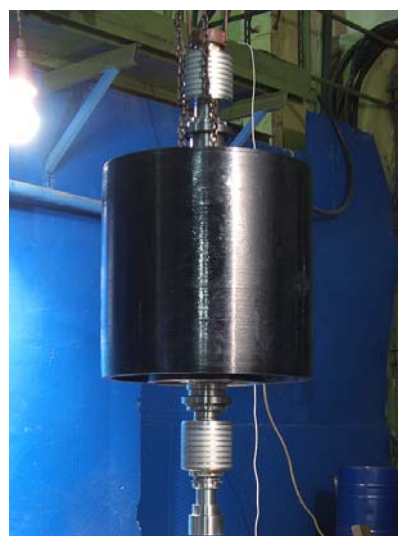


Рис. 4. Маховик с роторами (нижним и верхним) магнитного ВТСП подвеса

Основными элементами ВТСП подвесов являются статор и ротор (рис.5). Статор магнитного подвеса (рис. 5в) содержит блок с ВТСП элементами на основе иттриевой керамики (YBCO). Ротор магнитного ВТСП подвеса (рис. 6с)

состоит из последовательно расположенных вдоль оси магнитных колец на основе  $NdFeB$ , соединенных гильзой. Между магнитами расположены проставки (шиммы) из магнитомягкого материала, которые обеспечивают формирование необходимой структуры магнитного поля в зазоре между ротором и статором.

В КНЭ с запасаемой энергией 5 МДж используется мотор-генератор мощностью 100 кВт. Конструктивно это трехфазная шестиполусная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами из РЗМ на основе  $NdFeB$  с радиально-тангенциальной намагниченностью и безжелезным статором, что позволило, в свою очередь, сделать конструкцию мотор-генератора компактной (отсутствие обмоток на роторе), избежать потерь на перемагничивание в режиме хранения энергии и исключить энергозатраты на создание магнитного поля возбуждения. На рис. 6 показан статор мотор-генератора. Мотор-генератор был разработан в МАИ.



а



б



с

*Рис. 5. Узлы магнитного ВТСП подвеса:  
а – нижний ВТСП подвес; б – статор нижнего ВТСП подвеса с ВТСП блоком; с – ротор*



*Рис. 6. Статор мотор-генератора*

## ВЫВОДЫ

Применение КНЭ в автономных электроэнергетических системах с ВИЭ способствует интеграции ВИЭ в сеть с повышением их доли участия в системе генерации энергии, росту надежности и устойчивости энергетической системы, а также повышению качества электроэнергии для снабжения потребителей. Применение новых композитных материалов для изготовления маховиков

делает такой маховик достаточно надежным и безопасным, позволяя значительно увеличить скорость вращения маховика, а соответственно, и энергоёмкость системы накопления. Использование в конструкции КНЭ магнитных ВТСП подшипников повышает рабочий ресурс (более 20 лет) накопителя, создав экологически чистые системы накопления энергии с длительным сроком хранения запасённой энергии. Учитывая такие достоинства КНЭ как масштабируемость и модульность, на основе единичного КНЭ могут быть построены «матричные» системы накопления энергии на большие уровни запасаемой энергии и мощности как передвижного (контейнеры), так и стационарного исполнения. Предполагается, что система хранения чистой энергии будет служить надёжной альтернативой ископаемым видам топлива и сможет свести к минимуму зависимость от них, тем самым, способствуя сокращению выбросов углекислого газа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BloombergNEF, Energy Transition Investment Hit \$500 Billion in 2020 – For First Time. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://about.bnef.com/blog/energy-transition-investment-hit-500-billion-in-2020-for-first-time/>
2. Kovalev K., Poltavets V., Kolchanova I. Flywheel energy storage systems for autonomous energy systems with renewable energy sources. // International Scientific Electric Power Conference – 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012106 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/643/1/012106
3. Eyer, J. Benefits from Flywheel Energy Storage for Area Regulation in California // *Demonstration Results. Sandia National Laboratories* (Albuquerque, NM, USA). 2009
4. Forbes. Beacon Power to Build a Flywheel Plant to Keep the Grid in Good Health. 18 June 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.forbes.com/>
5. Gyuk I., Eckroad S. 2004 EPRI-DOE. Handbook Supplement of Energy Storage for Grid Connected Wind Generation Applications. // *Technical Update* 1008703
6. ENEL, Viale E. Enel signs agreement with US company Amber Kinetics on innovative flywheel storage system // *Press Release* July 2017 (Rome)
7. Amber Kinetics Smart Grid Demonstration Program Contract ID: DE-OE0000232 Project Type: Flywheel Energy Storage Demonstration // *Amber Kinetics Technical Report (Final)* Revision: V1.0. December 30, 2015
8. ABB, William Galton. Stabilizing and maximizing renewables using a flywheel-inverter system. RPI CFES // *Workshop on Microgrid Technology and Applications*: ABB, Oct. 2013.
9. ABB Microgrid Solutions. Worldwide Installations. Local Grids Management Systems *Workshop* October 28, 2015
10. Strasik M, Hull J R, Mittleider J, Gonder J, Johnson P, McCrary K and McIver C An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings // *Supercond. Sci. Technol.* **23** 2010

11. Koshizuka N The superconducting magnetic bearings and magnetic clutches for flywheel energy storage // *PASREG' 10 (Washington, DC)* 2010
12. Werfel F N, Floegel-Delor U, Riedel T, Wippich D, Goebel B and Rothfeld R HTS flywheel from R&D to pilot energy storage system// *J. Phys.: Conf. Ser.* 2010. **234** 032062
13. Werfel F N, Floegel-Delor U, Riedel T, Wippich D, Goebel B and Schirrmeister P Superconductor bearings, flywheels and transportation// *Supercond. Sci. Technol.* **25** (2012) 014007 (16pp) doi:10.1088/0953-2048/25/1/014007
14. Mukoyama S., Matsuoka T., Hatakeyama H., Kasahara, H., Furukawa M., Nagashima K. at ol. Test of REBCO HTS Magnet of Magnetic Bearing for Flywheel Storage System in Solar Power System.// *IEEE Transactions on Appl. Superconductivity.* 2015 **25**(3) pp 1–4. doi:10.1109/tasc.2014.2363044
15. Ковалёв Л.К., Ковалёв К.Л., Колчанова И.П., Полтавец В.Н. Зарубежные и российские разработки в области создания сверхпроводниковых машин и устройств// *Известия Российской академии наук. Энергетика.* 2012. № 6. С. 3-26.
16. Ковалёв К.Л., Полтавец В.Н., Колчанова И.П. Автономные энергетические системы с кинетическим накопителем энергии// *Электричество.* 2019. №9. С.30-40.

*Гибадуллин Ш. М., Лобанов А. В.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

*Аннотация:* в статье представлены результаты моделирования рабочих процессов мехатронных модулей малых перемещений на основе шарико-винтовой передачи.

*Ключевые слова:* мехатроника, малые перемещения, моделирование.

В последнее время во многих областях находят применение мехатронные модули малых перемещений. Прежде всего, это относится к технологическому оборудованию (подналадчики и корректоры перемещений, приводы станков), трубопроводной арматуре (задвижки и клапаны), медицинскому оборудованию (биоэлектрические и миотонические протезы; системы вспомогательного кровообращения и искусственного сердца), специальной технике. Особенностью мехатронных модулей малых поступательных перемещений является совмещение вентильного двигателя постоянного тока, исполнительного механизма, встраиваемого в полый ротор двигателя, а также цифровой системы управления в единый конструктивный элемент (модуль). В качестве исполнительного механизма наиболее часто используются винтовые передачи: винт-гайка скольжения, а также шарико-винтовые или планетарные ролико-винтовые механизмы, которые относят к передачам качения [1].

Применение в подвижных частях мехатронных модулей шарико-винтовых передач (ШВП) значительно улучшает характеристики всей системы. Преимущества ШВП в отличие от других исполнительных механизмов: высокий КПД порядка 90%, минимальное скольжение, возможность длительной работы без предварительного технического обслуживания. Кроме того, ШВП имеет высокую точность с погрешностью 2-3 мкм на 300мм [2].

Принимая во внимание все преимущества ШВП, актуальным является исследование перспективного метода построения мехатронных модулей малых перемещений. В основе метода лежит ШВП, конструктивно совмещенная с двигателем. В данном подходе двигатель является рабочим органом. Такая конструкция позволяет перемещать более массивные элементы, причем на более дальние расстояния. На рисунке 1 представлена модель схемы управления двигателем [3].

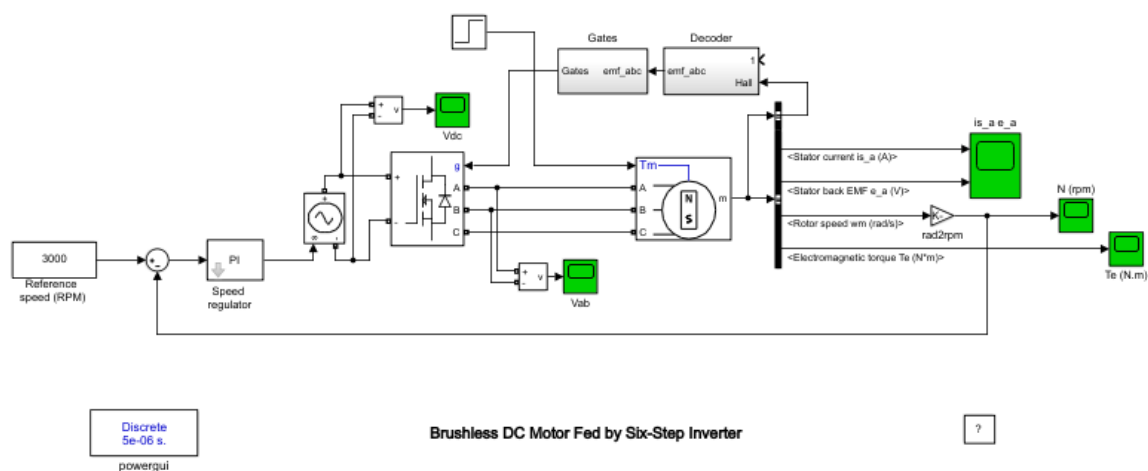


Рис. 1. Модель схемы управления двигателем

Модель включает в себя датчики, которые регулируют работу всей системы. Датчики принимают сигналы с рабочего двигателя, после чего они обрабатываются вычислительным центром. На рисунке 1 это показано обратной связью, регулирующей обороты двигателя. Точность движения зависит непосредственно от оборотов двигателя, точности датчиков и быстроты действия схемы. Кроме того, на точность движения также влияет метод обработки металла.

На рисунке 2 показаны графики тока и напряжения, потребляемые электродвигателем. Видно, что ток и напряжение в момент включения подсакаивают до максимального значения, это характерно для переходных процессов. После их окончания ток принимает минимальное значение до тех пор, пока нет необходимости совершения работы. Напряжение после переходных процессов достигает максимального значения, что позволяет держать обмотку двигателя в возбужденном состоянии. После того, как наступает время совершения работы, ток выходит на необходимую амплитуду вместе с напряжением. Такая схема работы положительно влияет на энергозатраты двигателя и на длительность работы всей системы.

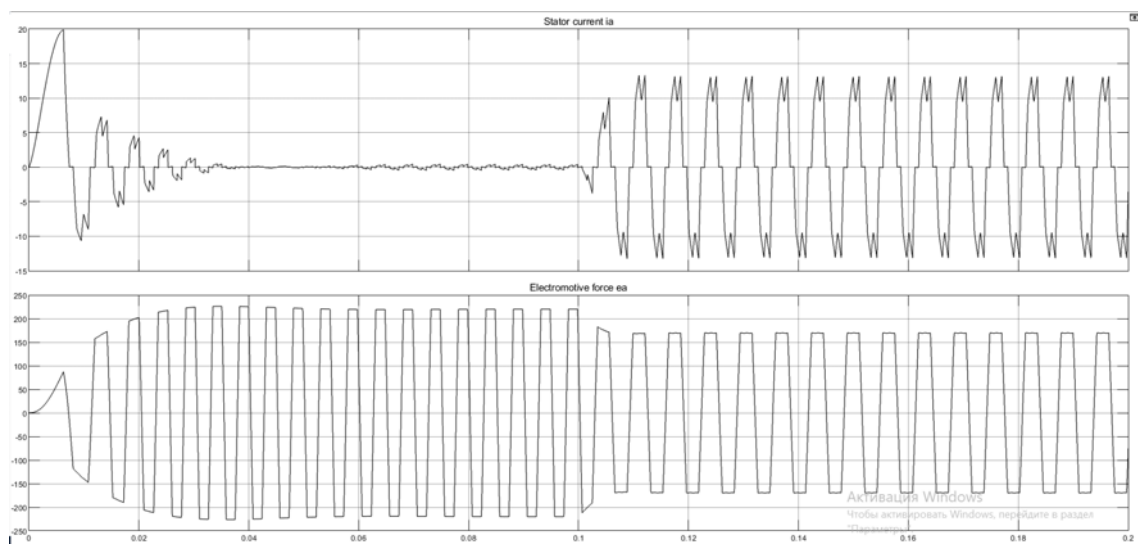


Рис. 2. Ток и напряжение, потребляемые двигателем

На рисунке 3 приведен график оборотов двигателя. Согласно ему, в момент включения электродвигателя обороты доходят до максимальных значений. После начала работы обороты опускаются до приемлемых значений, при которых возможно совершать работу без потерь. Это увеличивает ресурсы электродвигателя, а значит, увеличивается его срок работы.

В момент включения происходит переходной процесс, после чего система стабилизируется до момента выхода в рабочий режим.

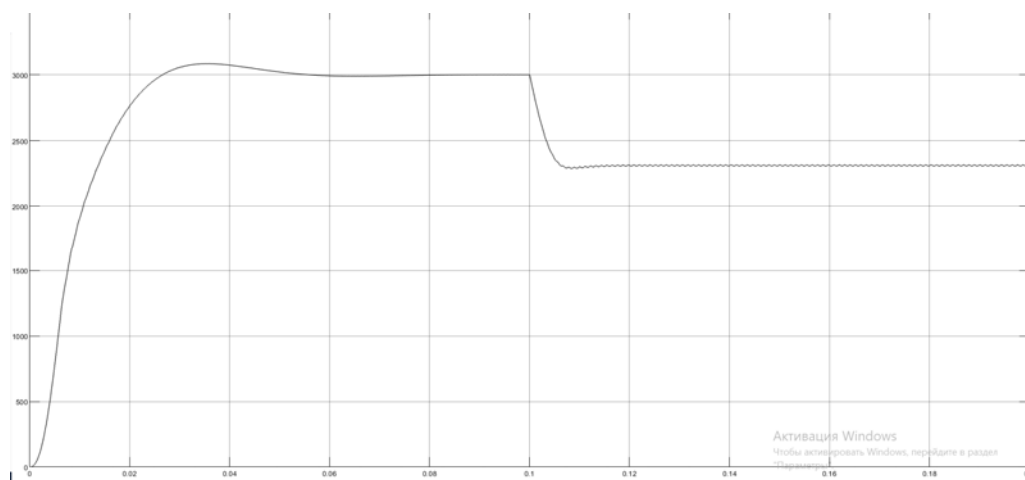


Рис. 3. Осциллограмма оборотов двигателя

Таким образом, использование в мехатронных модулях малых перемещений электродвигателей с ШВП позволяет достичь более высокой точности в перемещении объекта с минимальными затратами ресурсов при высоком КПД. Такое решение дает возможность использования высокоточных модулей в различных областях, а конструктивное объединение гайки с двигателем улучшает массогабаритные показатели, что делает возможным использование в ограниченных условиях пространства, где необходима высокая точность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ванюшина Е. В. Надежности мехатронных модулей поступательного перемещения // НиКа. 2010. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nadezhnosti-mehatronnyh-moduley-postupatel'nogo-peremescheniya> (дата обращения: 06.06.2021).
2. Хитерер М. Я. Синхронные электрические машины возвратнопоступательного движения / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников, Изд-е 3-е – СПб: КОРОНА принт, 2013. – 368 с.
3. Герман-Галкин С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2012. – 368 с.

*Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Елизарьев А. Ю., Максудов Д. В., Охотников М. В.*  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## **УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

*Аннотация:* В данной работе проведена оценка потерь наблюдаемых на высоковольтных линиях электропередачи. Рассмотрена математическая модель характеризующая зависимость падения напряжения на изоляторах, условия формирования электрической дуги на их поверхности и зависимости диэлектрической проницаемости воздушных промежутков при котором образуется электрическая дуга. Оценивается влияние параметров линии при различных условиях. Анализируются и сопоставляются факторы напрямую влияющие на процесс формирования электрического разряда. Произведена оценка формирования процесса короткого замыкания на линии. Предложены варианты решения и предотвращения возникновения данных ситуаций.

*Ключевые слова:* высоковольтная линия электропередачи, короткое замыкание, стримерный разряд

Согласно открытым данным публикуемым в отчетах Федеральной службы Государственной статистики (Росстата), ПАО «Россети», а так же исходя из других публичных источников, потери электроэнергии на линиях электропередач (ЛЭП) Российской Федерации (РФ) зависят от различных факторов в целом определяющих работу ЛЭП [1, 2, 3]. Отслеживая динамику ежегодного колебания потерь, можно заметить, что из года в год процент суммарных потерь, от общего объема передаваемой энергии колеблется в диапазоне от 7,3 до 13% . По итогам 2019 года уровень потерь электрической энергии составил 7,34 %, тем самым показывая стабильное снижение, в сравнении с уровнем в 8,95 % потерь за предыдущий год и 9,22% в 2017 году [1]. Доля потерь возникающих при коронировании и часто следующим за ним коротком замыкании (КЗ) в этом случае составляет порядка 35% от всех потерь, но данный процент изменяется в течении года, под влиянием различных погодных факторов [2]. Потери по данным отчетов (данные Системного оператора Единой энергетической системы), в 2019 году составили 71 242,2 млн. кВт·час, что показало снижение на 3 300 млн. кВт·час по сравнению с предыдущим годом (без учета технологически изолированной энергосистемы). В денежном эквиваленте суммарные потери тем не менее составляют значительную сумму и превышают 200 млрд. руб., из которых практически треть составляют потери из-за короны на ЛЭП [1, 4]. Оставшийся объем потерь составляют потери в оборудовании участвующем при генерации и передаче электроэнергии, утечки электроэнергии возникающие в результате аварий, а так же хищение электроэнергии из сети.

Если потери в оборудовании, а так же при хищении электроэнергии возможно снизить путем модернизации точек подключения потребителя либо



проведя установку энерго-эффективного оборудования, то потери возникающие на ЛЭП при коронировании возможно устранить лишь проведя оценку и исследование целого ряда факторов влияющих на возникновение данного эффекта на определенном участке сети.

Сам эффект коронирования возникающий вокруг токоведущего элемента ЛЭП, появляется в следствии ионизации токопроводящих частиц в образующемся электрическом поле высокой напряженности, что приводит к утечке тока в атмосферу [5]. Потери при этом определяются затратами энергии на перемещение ионов, составляющих объемный заряд, по направлению от провода. Превышение допустимых значений напряженности поля  $E_0$  вокруг провода, к примеру, из-за повышения напряжения на линии, либо увеличение влажности окружающего воздуха приводит к значительному снижению диэлектрической проницаемости воздуха, что в свою очередь приведет к возникновению электрического разряда и как факт к потерям. На практике подобный случай зачастую приводит к аварийному отключению линии благодаря срабатыванию защитной аппаратуры.

На рис. 1 представлена осциллограмма характеризующая подобный случай. Зафиксировано отключение линии «Линия 1» - 110, после КЗ на землю по фазе «А». Подтверждением КЗ является показание тока небаланса  $3I_0$ , возникшего из-за не симметрии, приведшее к срабатыванию токовой направленной защиты нулевой последовательности (ТЗНП). Данную версию так же подтвердили результаты обследования, указывающие на перекрытие через гирлянду изоляторов на опору из-за утренней росы, с успешным автоматическим повторным включением (АПВ). Рабочий ток линии на момента КЗ составлял 0,009 кА, за 5 мс ток возрос до 4.471 кА. При этом, плавного нарастания тока, который характеризовал бы формирование коронного разряда по фазе не наблюдается. Однако в течении предшествующих 5 мс, фиксировался рост показаний тока небаланса составивший 0,004 кА на протяжении 3 мс. Подобный скачек обуславливается резким изменением диэлектрической проницаемости воздушного промежутка, характерный при стремительной ионизации воздушного промежутка, за счет эффекта коронирования и сопутствующих этому процессу негативных факторов.

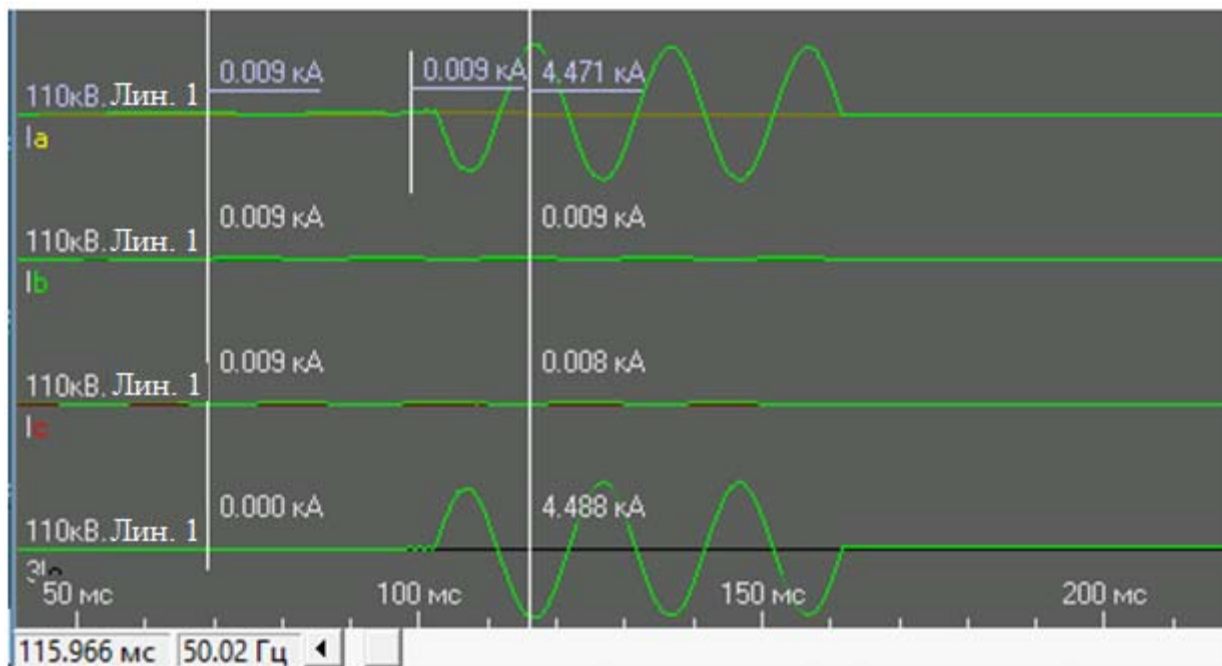


Рис. 1. Характеристики тока линии при аварии

Анализируя данные осциллограмм можно заметить, что установленные системы для регистрации показаний линии электропередачи не регистрирует токи утечки протекающие на линии из за лавинообразного нарастания стримерного разряда, ввиду изменения емкости и диэлектрической проницаемости воздушных промежутков изолятора, приводящих к КЗ.

Для аналитического представления процессов происходящих на изоляторах ЛЭП воспользуемся схемой замещения, представленной на рисунке 2. Здесь переменные  $C_{ni}$  и  $R_{ni}$  обозначают, соответственно, емкость и активное сопротивление  $i$ -го изолятора в гирлянде,  $C_{zi}$  – емкость между  $i$ -м изолятором и заземленными элементами линии,  $I_i$  – ток утечки, проходящий через  $i$ -й изолятор. Емкости  $C_{fi}$  между изоляторами и элементами линии, находящимися под напряжением, в данной модели считаются равными нулю.

Если поверхность изолятора является сухой и незагрязненной, то выполняется неравенство

$$X_{ni} = \frac{1}{2\pi f C_{ni}} \ll R_{ni}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота тока ЛЭП, и в таком случае проводимость имеет емкостный характер.

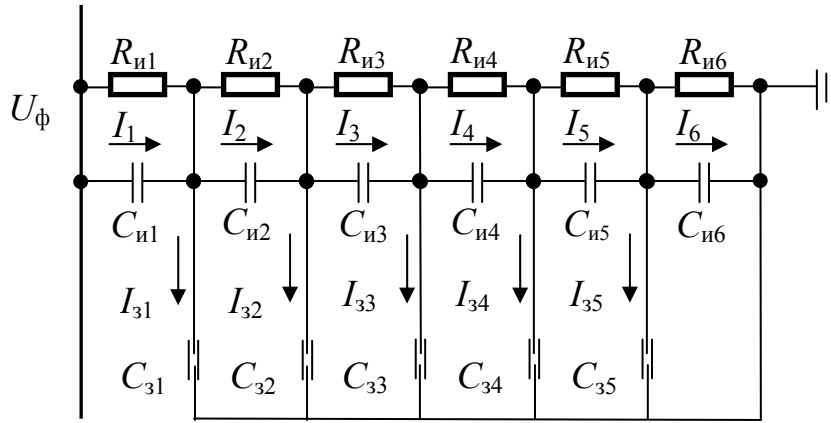


Рис. 2. Схема замещения для расчета падения напряжения на изоляторах ЛЭП (для случая 6-ти изоляторов в гирлянде)

Если сопротивления и емкости одинаковы,  $\forall i (R_{иi} = R_{и}, C_{иi} = C_{и}, C_{3i} = C_3)$ , то падение напряжения на  $i$ -м изоляторе определяется в соответствии с выражением

$$\Delta U_i = U_{\phi} \frac{I_i}{\sum_{j=1}^n I_j}, \quad (2)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение,  $n$  – число изоляторов в гирлянде.

Относительные значения токов утечки  $I_i$  могут быть найдены в результате итерационного процесса (3) – (4)

$$X_{3,j} = \begin{cases} \frac{X_{и} X_3}{X_{и} + X_3} & \text{если } j=1 \\ \frac{(X_{3,j-1} + X_{и}) X_3}{(X_{3,j-1} + X_{и}) + X_3} & \text{если } 1 < j < n-1, \end{cases} \quad (3)$$

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{если } j=1 \\ \frac{I_{j-1}}{1 + \frac{X_{3,n-j} + X_{и}}{X_3}} & \text{если } 1 < j < n \\ \frac{I_{n-1}}{1 + \frac{X_{и}}{X_3}} & \text{если } j=n, \end{cases} \quad (4)$$

где  $X_3 = \frac{1}{2\pi f C_3}$ ;  $X_{и} = \frac{R}{1 + 2\pi f C_{и} R}$ .

Пример результатов вычислений по формулам (3) – (4) для  $n = 6$ ,  $C_{и} = 30$  пФ,  $C_3 = 5$  пФ,  $f = 50$  Гц,  $U_{\phi} = 110/\sqrt{3}$  кВ показан на рис. 3.

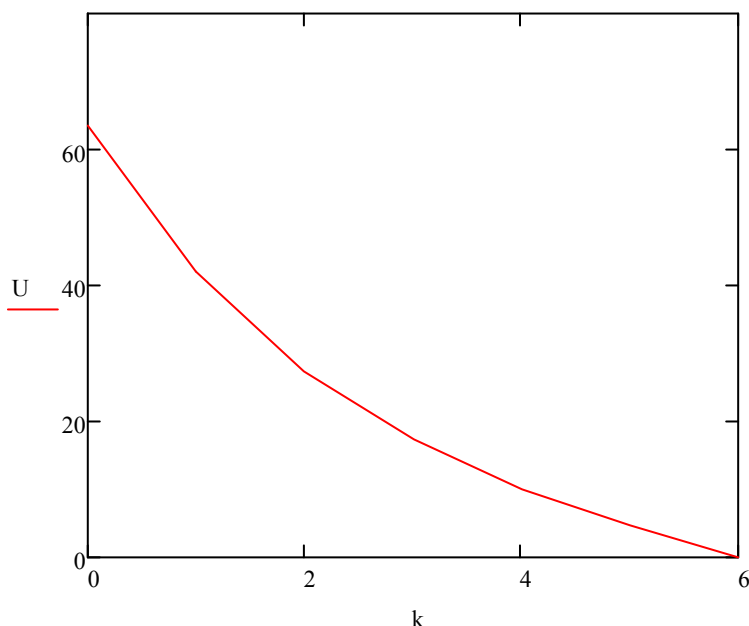


Рис. 3. Падение напряжения на изоляторах ЛЭП

Как видно из рисунка 3, наибольшее падение напряжения приходится на нижние изоляторы гирлянды, которые находятся ближе к проводу.

В случае если загрязненная поверхности изолятора увлажняется в результате дождя или выпадения росы, то на данной поверхности образуется проводящая пленка толщиной в десятые доли миллиметра. При этом условие (1) уже не выполняется, и активная проводимость начинает преобладать над емкостной. Активное сопротивление в этом случае определяется выражением

$$R = \frac{R_{п} R_{и}}{R_{п} + R_{и}}, \quad (5)$$

где  $R_{п}$  – сопротивление поверхностной пленки;  $R_{и}$  – сопротивление собственно изолятора, причем  $R_{п} \ll R_{и}$ .

Для изолятора цилиндрической формы

$$R_{п} = \frac{x}{\pi \gamma D}; \quad (6)$$

$$R_{и} = \frac{4 \rho_{и} x}{\pi D^2}, \quad (7)$$

где  $\rho_{и}$  – удельное сопротивление изолятора;  $x$  – длина пути тока утечки по увлажненной поверхности изолятора;  $D$  – диаметр изолятора;  $\gamma$  – поверхностная проводимость увлажненной поверхности.

В результате снижения сопротивления возрастает ток утечки и, соответственно, вызванные им тепловые потери. Выделение тепла приводит к тому, что поверхность изолятора начинает подсыхать, теряя при этом свои проводящие свойства. Подсыхание начинается с небольшого участка поверхности изолятора, где плотность тока наибольшая, и в дальнейшем распространяется перпендикулярно направлению тока утечки, в результате чего формируется кольцевая подсушенная зона шириной несколько миллиметров [7].

Сопротивление сухой кольцевой зоны

$$R_c = \frac{4\rho_i d}{\pi D^2}, \quad (8)$$

где  $d$  – ширина зоны, м.

Поскольку высушенная зона имеет низкую проводимость относительно остальной, все еще увлажненной поверхности изолятора, на этом участке появляется значительное падение напряжения

$$\Delta U_c = U_\phi \frac{R(\gamma_c, d)}{R(\gamma_c, d) + R(\gamma_b, L-d)}, \quad (9)$$

где  $L$  – длина гирлянды, м;  $\gamma_c$ ,  $\gamma_b$  – проводимости, соответственно, сухой и увлажненной поверхности изолятора, См;  $R(\gamma, x)$  – сопротивление, Ом, вычисленное согласно (5) – (7) при подстановке указанных значений проводимости и длины.

Если напряженность электрического поля, соответствующая данному падению напряжения,

$$E_c = \frac{\Delta U_c}{d}, \quad (10)$$

оказывается выше пробойного значения  $E_{пр}$  для воздуха на промежутке шириной  $d$ ,

$$E_c \geq E_{пр}, \quad (11)$$

то над высушенной зоной возникает электрическая дуга.

Результаты сопоставления  $E_c$  и  $E_{пр}$  для цилиндрического изолятора при  $U_\phi = 110$  кВ,  $L = 1,4$  м,  $d = 0,003$  м,  $\gamma_c = 10^{-9}$  См и различных значениях проводимости  $\gamma_b$  показаны на рис. 4.

Как видно из рисунка, условия для возникновения электрической дуги на поверхности возникают, когда проводимость  $\gamma_b$  превосходит определенное критическое значение.

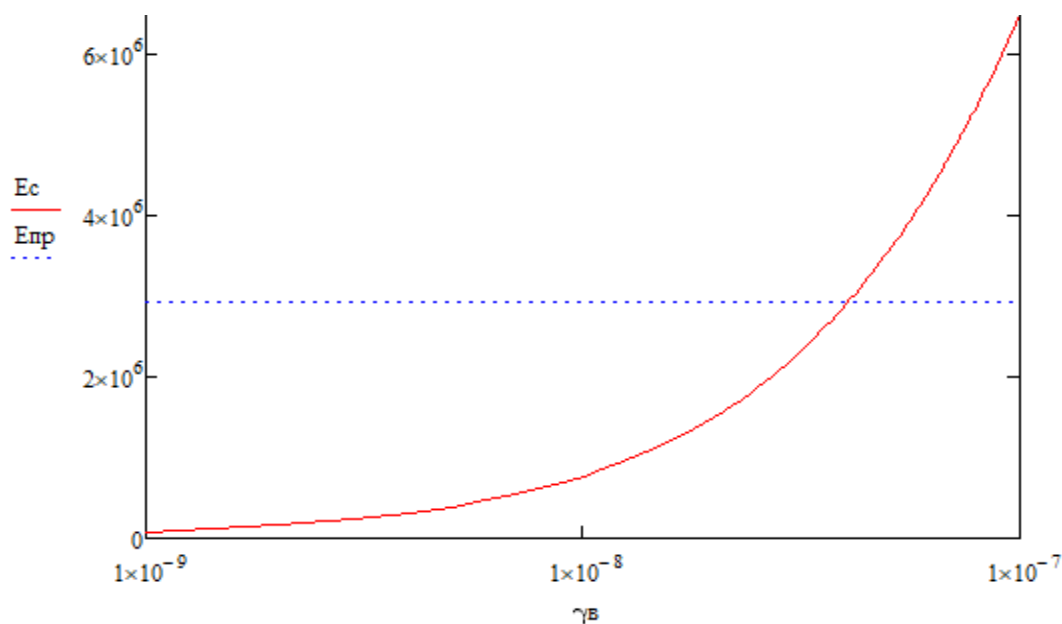


Рис. 4. Условия формирования электрической дуги на поверхности изолятора

При  $R_n \ll R_i$  данное критическое значение  $\gamma_B$  может быть найдено с учетом закона Пашена [6] из следующего неравенства

$$\frac{\gamma_B}{\gamma_c} \geq \frac{Bp(L-d)}{U_\phi \left[ \ln(Apd) - \ln \left( \ln \left( 1 + \frac{1}{k_{se}} \right) \right) \right] - Bpd}, \quad (12)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от состава газа;  $B$  – коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа;  $k_{se}$  – коэффициент вторичной электронной эмиссии;  $p$  – атмосферное давление, Па.

Для сухого воздуха экспериментально определены значения коэффициентов  $A$  и  $B$  составляют соответственно  $11,25 \text{ (Па} \times \text{м)}^{-1}$  и  $273,75 \text{ В} \times \text{(Па} \times \text{м)}^{-1}$ . [8].

В случае значительного увлажнения воздуха данные коэффициенты могут быть определены из формул для многокомпонентной газовой смеси [9]

$$A = \frac{\pi}{k_B T} r_{cp}^2, \quad (13)$$

$$B = AE_{иср}, \quad (14)$$

где  $r_{cp}$  – средний кинетический радиус молекул, м;  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $k_B \approx 1,3 \times 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – температура, К;  $E_{иср}$  – средняя энергия ионизации молекул, эВ;

Усредненные параметры молекул вычисляются, принимая во внимание молярные доли компонентов

$$r_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^n r_i p_i; \quad (15)$$

$$E_{\text{исп}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{иi}} p_i, \quad (16)$$

где  $n$  – количество веществ, входящих в состав газовой смеси;  $p_i$  – молярная доля  $i$ -го вещества;  $r_i$  – радиус молекулы  $i$ -го вещества, м;  $E_i$  – энергия ионизации молекулы  $i$ -го вещества, эВ.

Давление  $p$  определяется согласно барометрической формуле, что позволяет переписать неравенство (12) в виде, учитывающем высоту расположения ЛЭП над уровнем моря

$$\frac{\gamma_{\text{в}}}{\gamma_{\text{с}}} \geq \frac{L - d}{\frac{U_{\phi} e^{Mgh/RT}}{Bp_0} \left[ \ln(Ap_0 d) - Mgh / RT - \ln \left( \ln \left( 1 + \frac{1}{k_{se}} \right) \right) \right]} - d}, \quad (17)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R \approx 8,3 \text{ Дж} \times (\text{моль} \times \text{К})^{-1}$ ;  $T$  – температура, К;  $M$  – молярная масса воздуха, кг/моль;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $p_0$  – атмосферное давление на уровне моря,  $p_0 \approx 10^5 \text{ Па}$ ;  $h$  – высота над уровнем моря, м.

Правая часть неравенства (17) нелинейно зависит от высоты, однако в пределах диапазона высот, на которых строятся ЛЭП, эта зависимость близка к линейной (см. рис. 5).

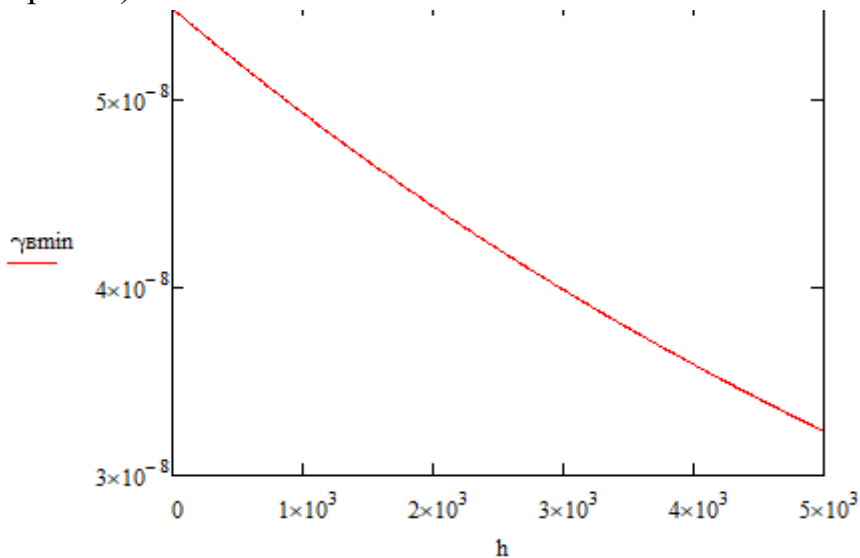


Рис. 5. Зависимость минимального значения проводимости увлажненной поверхности  $\gamma_{\text{в}}$ , См, при котором образуется электрическая дуга, от высоты над уровнем моря  $h$ , м, при  $U_{\phi} = 110 \text{ кВ}$ ,  $L = 1,4 \text{ м}$ ,  $d = 0,003 \text{ м}$ ,  $\gamma_{\text{с}} = 10^{-9} \text{ См}$  (модель для цилиндрического изолятора)

Подтверждением данных выводов и определением наиболее аварийных участков ЛЭП может являться карта аварийных отключений высоковольтных линий (см. рис. 6). Можно заметить, что наибольшая концентрация данных случаев наблюдается в гористой местности, т.е. в районах с резким перепадом высот, давления, температурных и климатических показателей, в определенный момент приводящих к критическому стечению обстоятельств и наступлению аварийной ситуации, что и подтверждает теоретические обоснования наступления данного процесса.

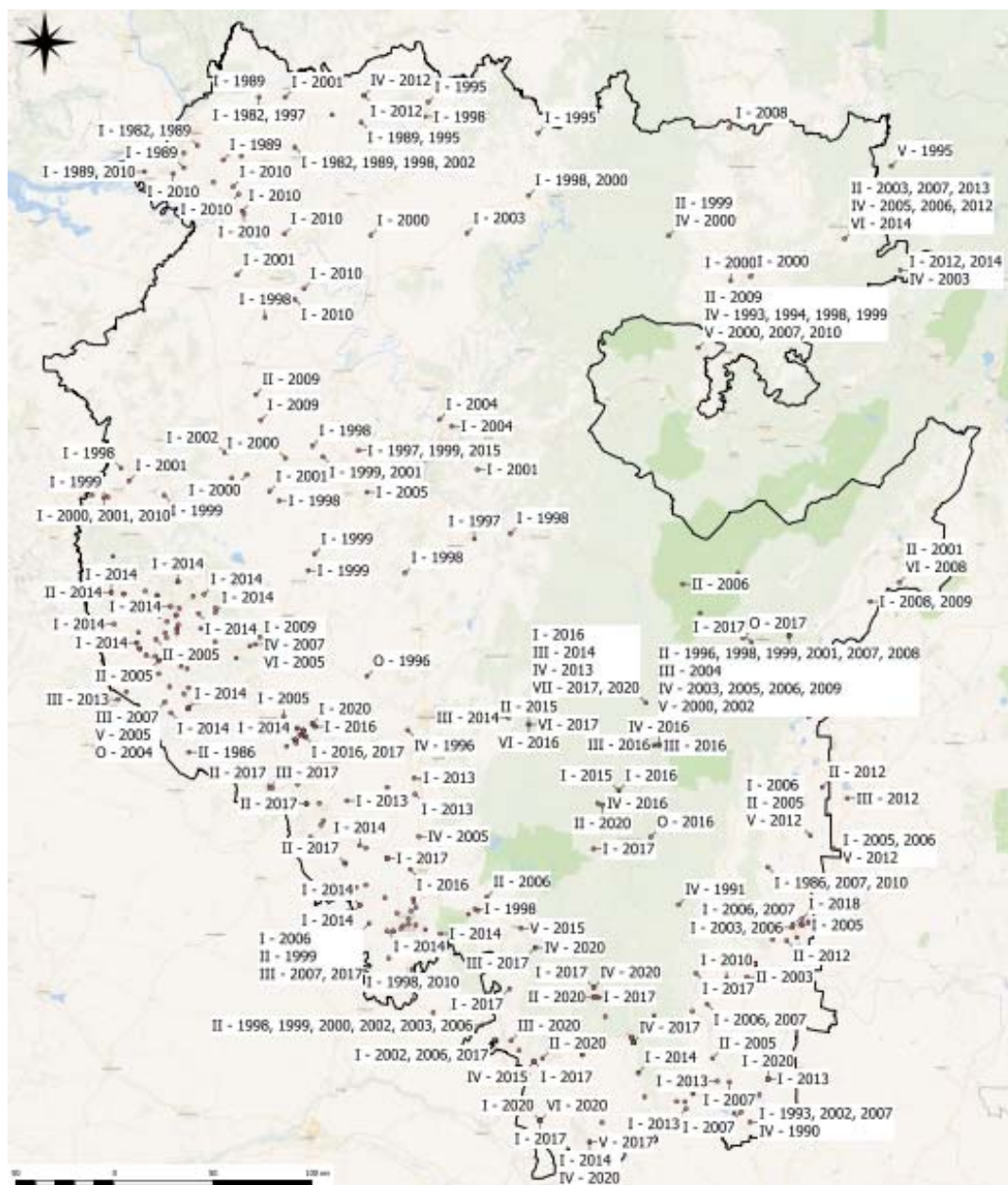


Рис. 6. Аварийные отключения ЛЭП 35 – 500 кВ

В целом анализируя данные получаемые с действующей линии и теоретические выводы можно судить о том, что системы применяемые на подстанциях ЛЭП для регистрации показателей изменения токов и напряжений



на линии недостаточно совершенны. Возникает необходимость в модернизации оборудования на системы способные фиксировать минимальные токи утечки и давать сигнал оперативному персоналу для выполнения мероприятий по предупреждению возникновения подобных аварийных ситуаций. С точки зрения научных исследований появляется необходимость в более подробном исследовании процессов происходящих на ЛЭП в момент предшествующий КЗ, определения влияния на него эффекта коронирования и выделяемого при этом озона, изменения химического состава окружающего воздуха за счет испарения частиц металла на участке короны и электрической дуги при КЗ.

Перспективность и необходимость в проведении исследований в области электроэнергетики определяется тенденциями развития промышленного сектора экономики России, развитием возобновляемых источников энергии и т.д., что и демонстрирует компания ПАО «Россети» выделяя 0,25 % от собственной выручки на проведение НИОКР в данной области. В декабре 2019 г. Совет директоров ПАО «Россети» утвердил новую Стратегию ПАО «Россети» на период до 2030 г., определяющую цели развития группы компаний «Россети» и направленную на дальнейшее снижение потерь электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годовые отчёты ОАО «Россети» и ПАО «Россети» 2010-2019 г.г, [rosseti.ru](http://rosseti.ru).
2. А.А. Геркусов, В.М. Макаров Технико-экономическое нормирование потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше. «Вестник ИГЭУ» Вып. 4 2016 г. С. 49 - 56.
3. Геркусов А.А. Оптимизация потерь электроэнергии, передаваемой по воздушным линиям 110 кВ и выше // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – № 1(214). – С. 89–96.
4. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2018 году. АО «СО ЕЭС» [www.so-eps.ru](http://www.so-eps.ru).
5. Довбыш В.Н., Сподобаев Ю.М. Оценка радиочастотных помех, создаваемых короной высоковольтной линии электропередач. Спецвыпуск Т Comm, август. 2009. С. 77 – 79.
6. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда / Пер. И.И. Ивангина. – М.: Атомиздат. 1980. – 182 с.
7. Александров Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 360 с.
8. Husain E., Nema R. Analysis of Paschen Curves for air, N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> Using the Townsend Breakdown Equation. IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1982. EI-17 (4). PP. 350–353.
9. Maksudov D.V., Okhotnikov M.V. Modeling of the barrier discharge in the exhaust gases of automobile. Materials of Int. Conf. Electrotec. complexes and systems ICOECS-2019, PP.10-116.

Шикульская О. М.<sup>1</sup>, Абуова Г. Б.<sup>1</sup>, Шикульский М. И.<sup>2</sup>, Урумбаева О. Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>2</sup>Астраханский государственный технический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСЕТЬЮ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ**

*Аннотация:* Предложен новый подход к концептуальному проектированию элементов систем управления на основе фрактальной теории, который позволяет моделировать датчики нового поколения.

*Ключевые слова:* физический принцип действия, фрактал, теория энерго-информационных моделей цепей, параметрическая структурная схема, физико-технический эффект, система управления, электрическая энергосистема.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время вследствие развития электроэнергетических систем существует острая необходимость повышения качества их работы, что приводит к усложнению их структуры, и, кроме прочего, требует прогнозирования электрической нагрузки энергосистемы.

Такие прогнозы должны учитывать совокупность всех факторов (качественных и количественных), влияющих на потребление электроэнергии. Для обеспечения возможности таких прогнозов в работе [1] предлагается использовать системы искусственного интеллекта, позволяющие строить прогноз с высокой точностью.

Количественная информация, необходимая для прогнозирования, должна быть получена с помощью интегрированных информационно-измерительных и управляющих систем, в которых можно указать три основных компонента: датчики, актюаторы и контроллер (рис. 1).

Микроэлектронная «революция» в основном повлияла на центральный элемент системы, такой как подсистема анализа информации и принятия решений. Относительное отставание в подходах к созданию подсистем сбора информации (датчиков) и воздействия на объект (активаторы) является слабым звеном систем управления.



Рис. 1. Структура информационно-измерительной и управляющей системы энергосетью

Для прогресса в этом направлении необходим единый подход к проектированию элементов подсистем датчиков и актюаторов (исполнительных механизмов).

Качество проектных решений во многом определяется результатами начальных этапов проектирования, на которых принимаются основополагающие решения о структуре и принципе действия проектируемого устройства. Производство датчиков связано с реализацией передовых научно-технических достижений. Некоторые современные физические явления представлены как эффекты, реализуемые в новых технических решениях. Принимая во внимание широкий спектр физических явлений и эффектов, разработчик должен выбирать в каждом конкретном случае наиболее эффективный для реализации любой определенной функции любого технического устройства. Для обеспечения эффективности начальных этапов проектирования необходимо внедрить современные компьютерные технологии.

В научном мире имеется значительное количество научных работ [2-7], посвященных решению этой проблемы, однако, ученые не могут применить эти научные разработки для некоторых современных датчиках, в частности, это относится к классу multifunctional датчиков, вследствие недостаточно эффективной структуры синтезированных систем.

С учетом выше сказанного широко обсуждается новая проблема поиска эффективного подхода к описанию процессов, протекающих в датчиках, позволяющего синтезировать современные датчики и применения его для

автоматизации концептуального проектирования различных современных датчиков систем управления энергетической сетью.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наибольшая эффективность при проектировании новых технических устройств достигается за счет единообразного подхода к решению задач из разных областей, переноса сильных решений из одной области в другую. Такой подход реализуется на основе теории энерго-информационных моделей цепей (ЭИМЦ) и аппарата параметрических структурных схем (ПСС), которые позволяют описывать явления различной физической природы с помощью уравнений, инвариантных к самой физической природе (механических, электрических, тепловых и т.д.).

Следует отметить, что в связи с появлением новых уникальных возможностей, предоставляемых использованием современных технологий и материалов, возникли задачи, которые нельзя решить на основе теории ЭИМЦ. Выявленные ограничения на синтез предложено устранить с помощью применения теории фракталов. Использование фракталов обеспечивает значительное упрощение алгоритмов на основе итеративных процедур и рекурсивных функций.

Авторы предлагают использовать теорию ЭИМЦ и аппарат ПСС с применением фрактального подхода для концептуального проектирования датчиков информационно-измерительных и управляющих систем электро-энергетических сетей, предназначенных для мониторинга параметров самих сетей и окружающей среды.

## 2. КОНЦЕПЦИЯ ФРАКТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ

Центральным понятием концепции является функциональный фрактал (ФФ). Это понятие введено впервые. ФФ — это аналитическая модель с графической интерпретацией физического принципа действия чувствительных элементов датчиков (ЧЭД), инвариантная к физической природе и степени детализации описываемых явлений и процессов. В ФФ ФПД ЧЭД разложен на ряд иерархических уровней по степени подробности отражения преобразований

на основе использования одних и тех же принципов декомпозиции, точно или приближенно обеспечивающих масштабную инвариантность системы.

Авторами разработана концептуальная модель физического принципа действия чувствительных элементов систем управления (ФПД ЧЭ СУ) в виде ФФ (рис. 2).

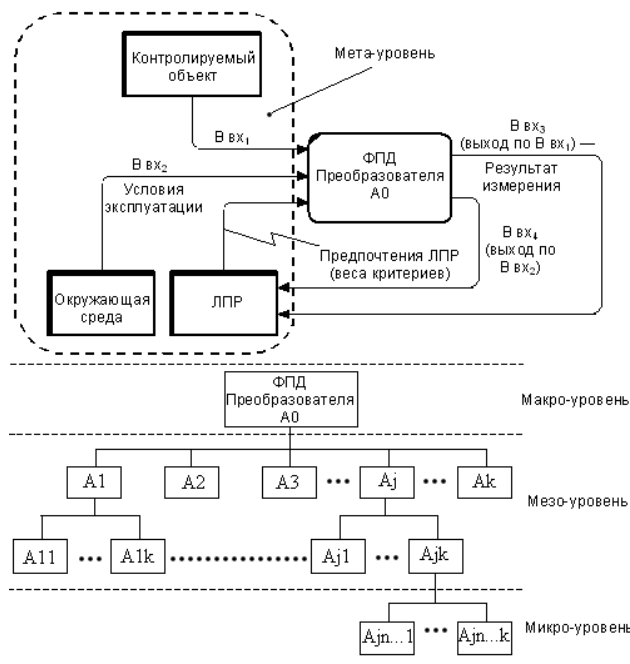


Рис. 2. Концептуальная модель ФПД датчика в виде функционального фрактала

ФФ как система иерархической структуры включает четыре уровня: мета-, макро-, мезо- и микро-уровень. При переходе с более высокого иерархического уровня на более низкий производится декомпозиция процесса преобразования. При этом степень подробности его описания возрастает. Диапазон изменения масштаба ФФ определяет количество уровней иерархии.

Для ФФ введены два типа самоподобия: жесткое самоподобие (ЖС) — самоподобие, связанное инвариантностью относительно масштабных преобразований, и нежесткое (ковариантное) самоподобие (НС), предполагающее неединообразное преобразование фрагмента во все множество. ЖС означает идентичность структуры соединения звеньев системы на всех уровнях иерархии. ФФ с НС обладают масштабной инвариантностью приближенно. Модель ФПД ЧЭД в виде функционального фрактала на основе принципа ЖС (рис.3) отражает вложенность подобных структурных элементов.

ФФ с ЖС состоит из основы (фрагмента ЭИМЦ) и образующего элемента (фрагмента ЭИМЦ, повторяющегося при каждом уменьшении масштаба).

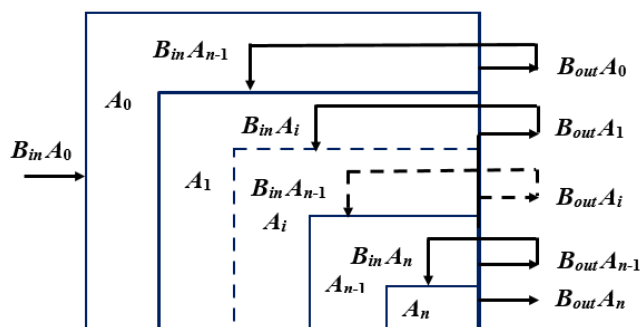


Рис. 3. ФПД датчика в виде функционального фрактала на основе принципа жесткого самоподобия

Реализация фрактального подхода к явлениям и процессам, происходящим в датчиках, основана на исследованиях предшественников в области теории ЭИМЦ и не противоречит им. ЕИСМ может рассматриваться как специальный случай ФФ с диапазоном изменения масштаба, равным 1.

Использование фрактального подхода к проектированию элементов систем управления позволяет автоматически синтезировать новые многофункциональные датчики величин оригинальных конструкций, которые невозможно было синтезировать на основе известных ранее методов автоматизированного проектирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно сказать, что сформулированы новые принципы моделирования датчиков на основе фрактального подхода к описанию процессов, позволяют решить все соответствующие проблемы энергоинформационного моделирования и открывают новые возможности для технических достижений в области концептуального проектирования элементов информационно-измерительных и управляющих системы для электрических энергетических сетей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Shikulskaya, O. Urumbaeva and T. Shalaev, "Concept of Intelligent Energy Grid Control Based on Upgraded Neural Network," 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278420.

2. Altshuller, G.S. About submission of physical laws, effects and the phenomena in a bi-field form: The manuscript in fund ChOUNB / G.S. Altshuller, Yu.V. Gorin, 1975. - inv. No. 213
3. Fomenkov, S.A., Korobkin, D.M., Kolesnikov, S.G., Kamaev, V.A., Kravets, A.G.: The automated methods of search of physical effects. In International Journal of Soft Computing (2015)
4. Korobkin, D.M., Fomenkov, S.A., Kolesnikov, S.G., Kizim, A.V., Kamaev, V.A.: Processing of structured physical knowledge in the form of physical effects in Proceedings of the European Conference on Data Mining 2015, ECDM 2015 and International Conferences on Intelligent Systems and Agents 2015, ISA 2015 and Theory and Practice in Modern Computing 2015, TPMC 2015 - Part of the Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2015 (2015)
5. Iosifov, V.P., Kamaev, V.A., Melikov, A.V., Korobkin, D.M. Simulation of the problem determination of dynamic characteristics of measuring / IISA 2015 - 6th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications. 2015
6. Fomenkova, M.A., Kamaev, V.A., Korobkin, D.M., Fomenkov, S.A.: The methodology of semantic analysis for extracting physical effects. In Journal of Physics: Conference Series (2017)
7. Korobkin, D.M., Fomenkov, S.A., Kolesnikov, S.G., Golovanchikov, A.B. Computer-aided design of the new technical systems based on the physical effects database / 2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications, IISA 2017

*Абдулин Р. Р.<sup>1</sup>, Подшибнев В. А., Рожнин Н. Б., Самсонович С. Л.*

<sup>1</sup>АО «МНПК» Авионика

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

## **РАЗРАБОТКА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА РЕЗЕРВИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ЛА НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА**

*Аннотация:* Статья посвящена актуальной задаче обоснования архитектуры отказоустойчивой конструкции и технических решений, обеспечивающих построение исполнительных механизмов электромеханических приводов на основе дифференциальных механических передач. Проведено сравнение различных дифференциальных механизмов, даны рекомендации по их применению.

*Ключевые слова:* электромеханический привод, исполнительный механизм, дифференциальный механизм.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основным требованием, предъявляемым к резервированному электромеханическому приводу (ЭМП) для беспилотных и пилотируемых ЛА является обеспечение штатной работы при возникновении не менее двух электрических и одного механического отказов [1]. Это требование достигается разработкой отказоустойчивой конструкции исполнительного механизма (ИМ)

привода, содержащего датчики диагностирования отказов и устройства структурного резервирования.

Дифференциальный механизм представляет собой механизм, в котором содержатся два входных и одно выходное звено, т.е. механизм позволяющий получать на выходном звене результирующее движение как сумму или разность составляющих движений входных звеньев.

Учитывая, что для беспилотных и пилотируемых ЛА важны массогабаритные показатели ЭМП, из-за чего в ЭМП используют высокоскоростные ЭД с редуктором, имеющим большое передаточное число, целесообразно строить дифференциальный механизм на основе механических передач с большим передаточным числом. К таким передачам относятся, планетарные передачи, зубчатые волновые передачи с гибким колесом и ВПТК [2].

## 2.ОБОСНОВАНИЕ ТИПА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Чтобы обосновать выбор дифференциальной передачи для ЭМП беспилотного или пилотируемого ЛА сравним эти передачи по массогабаритным показателям и техническим характеристикам.

В таблице 1 приведены схемы рассматриваемых передач с диапазоном рекомендуемых передаточных чисел  $q$  и расчетными формулами наружного диаметра дифференциала, как наиболее важного параметра.

В схеме с планетарной передачей для идентичности работы каналов ширина зубчатого венца каждого из каналов выполнена из условия одновременного зацепления, как с сателлитом, так и с цилиндрическим зубчатым колесом, расположенным на выходном звене промежуточного редуктора каждого из каналов. Выбор диаметров колес, обуславливается достижением одинаковых передаточных чисел каналов от ЭД до выходного звена дифференциального механизма, т.е. выходного звена ИМ.

В качестве стопорного устройства могут быть использованы механизмы однонаправленного действия: муфты стопорения или муфты необратимого



движения, а также передачи, обладающие свойствами самоторможения.

При возникновении механического отказа в одном из каналов он самотормозится и исправный канал, не тратит энергию на движение элементов неисправного канала.

Зависимости наружного диаметра дифференциального механизма от развиваемого момента для разных типов механических передач приведены на рис.1.

Таблица 1

Дифференциальные механизмы

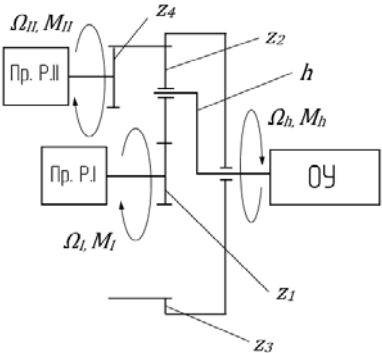
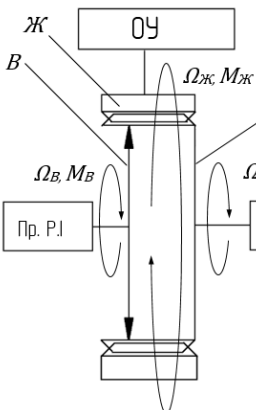
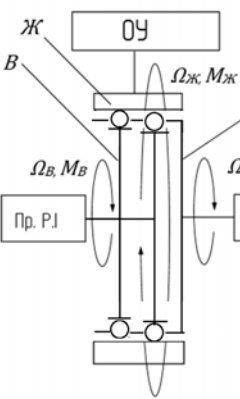
Планетарная передача 2k-h	Волновая зубчатая передача	ВПТК
 $q = q_{1-H}^z = \frac{z_2}{z_1} \cdot q_{2-H}^1 = [2..$ $q_{opt} = 4$	 $q = q_{B-J}^{\Gamma} = [70..$ $q_{opt} = 100$	 $q = q_{B-J}^C = [6..3$ $q_{opt} = 9..15$

Схема дифференциального механизма на основе волновой зубчатой передачи позволяет реализовывать передаточные числа от 70 до 300 в одной паре, что значительно больше чем в схеме на основе планетарной передачи. При этом значения передаточного числа не влияет на наружный диаметр передачи.

Волновая передача многопарная, в ней одновременно передает момент примерно половина зубьев, что увеличивает надежность, жесткость и уменьшает люфт. Недостатком приведенной схемы является не идентичность динамических характеристикам, так как каналу, передающему движение через

жесткое колесо необходимо преодолевать дополнительный момент инерции всей волновой зубчатой передачи. Наличие гибкого колеса обуславливает сравнительно меньший наружный диаметр (см.рис.2.) из рассмотренных передач.

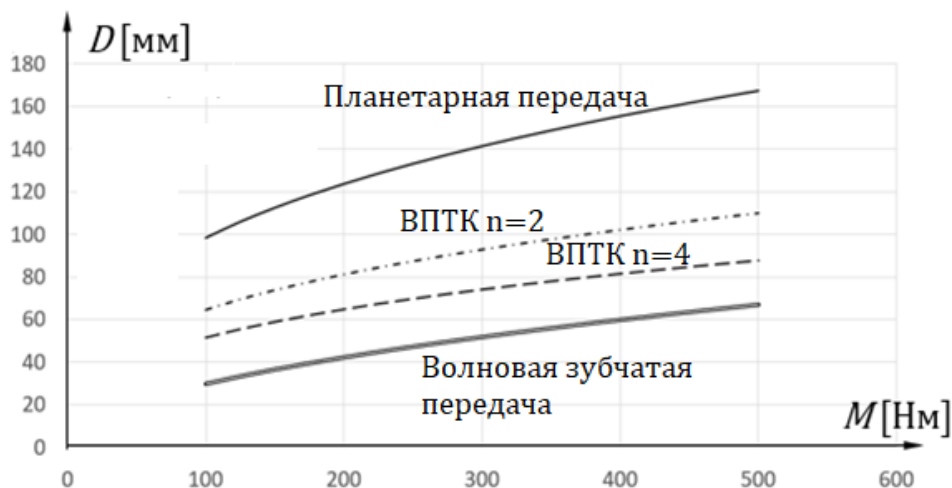


Рис. 1. Зависимость наружного диаметра дифференциала от передаваемого момента.

Наличие тел качения в дифференциальном механизме с ВПТК, расположенных в гнездах сепаратора, исключает заклинивание тел качения, а также трение скольжения в волновой зубчатой передаче заменено на трение качения [2]. В конструкции использованы дисковые волнообразователи на подшипниках с малым моментом инерции, что позволяет получить высокие динамические характеристики.

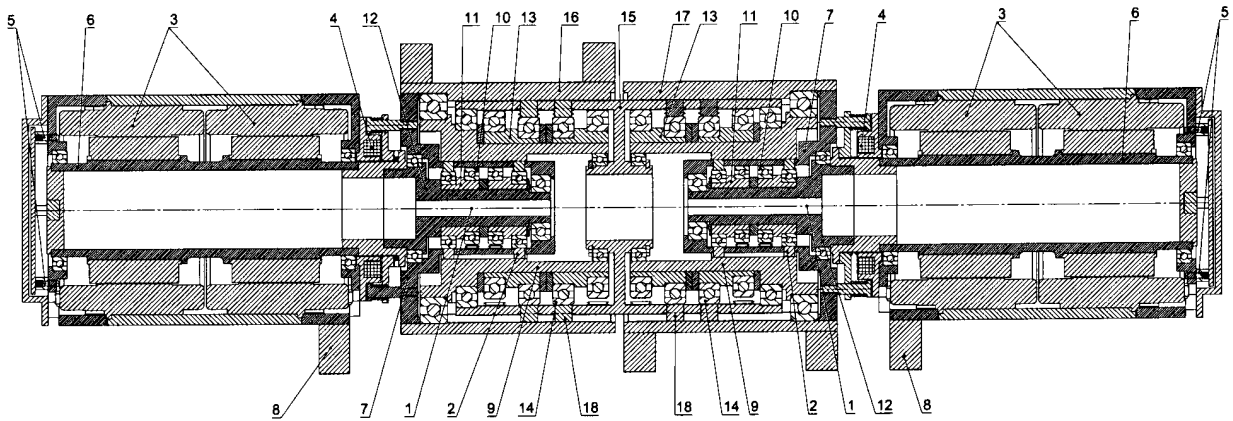
Использование многорядного расположения тел качения позволяет реализовать требуемый момент с уменьшенным диаметром жесткого колеса. На рис. 6 представлены зависимости диаметра ВПТК от момента нагрузки для схем с двумя и четырьмя телами качения.

### 3. ПРЕДЛОЖЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ

На рис. 2 приведено продольное сечение резервированного электромеханического привода на основе ВПТК, предложенного авторами [3].

Резервированный электромеханический привод состоит из основного и

резервного каналов управления, дифференциальной волновой передачи с телами качения и датчика положения объекта регулирования (датчик положения располагается на валу объекта регулирования и на рис. 2 не показан).



*Рис. 2.* Двухканальный резервированный ИМ с дифференциальным механизмом на основе ВПТК

Каждый канал управления содержит волновую передачу 1 с телами качения 2 (на рис.2 использованы ролики), два бескорпусных бесколлекторных электродвигателя 3 (как показано на рис.23) или один с двумя обмотками на статоре, электромагнитный тормоз 4 с двумя обмотками управления (как показано на рис. 2) или по тормозу на каждый электродвигатель 3, по два датчика 5 положения вала 6 роторов электродвигателей 3 и два датчика тока (на рис. 2 не показаны).

Волновая передача с телами качения каждого канала включает волнообразователь, который является входным звеном, сепаратор 7 с телами качения 2, который является промежуточным звеном, закрепленным к корпусу 8, и выходное жесткое колесо 9. Волнообразователи выполнены дисковыми на подшипниках 10 с эксцентриками 11, насаженными на ось 12, жестко соединенную с валом 6 роторов электродвигателей 3. На жестких колесах 9 каждого канала размещены эксцентрики 13 с подшипниками 14, которые являются волнообразователями - ведущими звеньями дифференциальной волновой передачи. Дифференциальная волновая передача выполнена по схеме

с общим сепаратором 15 и двумя жесткими колесами 16 и 17. Сепаратор 15 установлен с возможностью вращения относительно корпуса 8, а его тела качения 18, взаимодействующие с волнообразователем основного канала, контактируют с жестким колесом 16, являющимся выходным звеном привода, а тела качения 18, взаимодействующие с волнообразователем резервного канала с жестким колесом 17, закрепленным к корпусу 8.

#### 4. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ

При расчете надежности обычно делаются следующие допущения:

- отказы – события случайные и независимые;
- старение элементов в пределах ресурса отсутствует, т.е. закон распределения отказов экспоненциальный;
- все элементы системы перед началом работы проверены и исправны;
- вероятность отказа при экспоненциальном распределении в интервале времени  $(t, t+\Delta t)$  зависит только от длины интервала и не зависит от времени предшествующей работы  $(t)$ . [4].

Так как ВПТК является передачей с многопарным зацеплением в каждом ряду тел качения и при этом каждое из тел качения находится в отдельном гнезде сепаратора, то принимаем, что деформация какого-либо из тел качения не приводит к заклиниванию механизма, а может привести только к увеличению трения и люфта.

Из данного рассуждения следует, что интенсивность отказов механизма на основе ВПТК определяется интенсивностью отказов подшипников, обеспечивающих соосность звеньев ВПТК, а интенсивностью отказов кинематических пар «сепаратор с телами качения – жесткое колесо», «сепаратор с телами качения – волнообразователь», при практических расчетах можно пренебречь.

На этом основании интенсивность отказов ИМ, показанного на рис.2. составляет  $8,41 \cdot 10^{-10}$  1/ч.

Расчетная величина интенсивности отказов такого ИМ значительно меньше интенсивности отказов электрогидравлического привода, приведенной в работе [5], составляющей  $25-30 \cdot 10^{-6}$  [1/ч].

## ВЫВОДЫ

Использование в качестве устройств переключения каналов разработанных на АО МНПК «Авионика» совместно с кафедрой 702 МАИ дифференциальных механизмов позволяет реализовать два идентичных канала, которые могут работать одновременно или поочередно в качестве основного или резервного канала с одинаковыми статическими и динамическими характеристиками и высокими показателями надежности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. С. Алексеенков, С. А. Ермаков, С. В. Константинов [и др.] под редакцией С. В. Константинова Системы электрогидравлических рулевых приводов комплексов управления полетом самолетов; Минобрнауки России, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). – Санкт-Петербург : Издательство СПбГЭТУ, 2019.
2. Н.В. Крылов, В.И. Лалабеков, И.И. Огольцов и др.; Под ред. С.Л. Самсоновича. Электромеханические силовые мини-приводы для «более электрифицированного» самолета / Н— М.: Изд-во МАИ, 2016. — 360 с.
3. Резервированный электромеханический привод Патент РФ № 2 736 658 Оpubл.: 19.11.2020 Бюл. № 32
4. Константинов С. В., Редько П. Г., Ермаков С. А. Электрогидравлические рулевые приводы систем управления полетом маневренных самолетов: Учебное пособие. — Москва: Издательство "Янус-К", 2006. — 316 с.
5. Ермаков С.А., Карев В.И., Митриченко А.Н., Селиванов А.М., Сухоруков Р.В. Системы рулевых приводов пассажирских самолётов, их развитие и обеспечение безотказности управления // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 18–29

Семёнов А. С., Семёнова М. Н., Бебихов Ю. В.<sup>1</sup>, Егоров А. Н.<sup>2</sup>, Васильев П. Ф., Харитонов Я. С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном

<sup>2</sup> Специализированный трест «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА»

<sup>3</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ВИБРАЦИОННОГО ПИТАТЕЛЯ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ MATLAB**

*Аннотация:* Вибрационные питатели занимают не последнее место в технологических процессах горных предприятий, поэтому качественное исполнение и настройка режимов работы поточно-транспортной системы, обеспечивающей подачу материала в рентгенолюминесцентные сепараторы, может обеспечить повышение извлечения алмазов и снизить энергоёмкость производства путем уменьшения расхода электроэнергии. Полученные в работе результаты могут быть применены на обогатительных фабриках по обогащению алмазосодержащих пород для расчета мощности привода вибропитателя и подбора типа системы электропривода с точки зрения оптимальности для технологического процесса и энергоэффективности.

*Ключевые слова:* электромагнитный привод, электромеханическая система, математическое моделирование, MatLab, поточно-транспортная система, вибрационный питатель, резонансная частота.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Повышение эффективности использования энергетических ресурсов является одним из факторов, способствующим стабильности и устойчивому развитию экономики во всех отраслях промышленности. Одной из наиболее энергоёмких сфер промышленности является горнодобывающее производство [1]. Увеличение электропотребления горной промышленностью вызывается не только ростом производства, но и качественными изменениями технологии, усложнением условий добычи и переработки руды, внедрением природоохранных мероприятий и пр. [2].

Вибрационные питатели занимают не последнее место в технологических процессах горных предприятий, поскольку в отличие от других видов питателей позволяют создать относительно устойчивый, равномерный поток материала, а также имеют возможность запуска с завалом подающего бункера. При комбинировании технологии вибрационных перемещений материала и применения различных колосниковых решеток и сит, можно достичь сепарации сыпучего материала по размерам кусков или фракций [3]. Современная

номенклатура вибрационных питателей включает в себя широкий диапазон производительностей от десятых долей до нескольких сотен кубических метров материала в час, а крупность загружаемого материала может достигать 750 мм.

Обогащение алмазосодержащего сырья – сложный технологический процесс, зависящий от количественного содержания полезного компонента в руде, требующий большего числа подготовительных и основных операций для получения конечной продукции, при обеспечении в процессе обогащения крупности и качества алмаза без нарушений [4]. Рентгенолюминесцентная сепарация, используемая на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» (ПАО), обеспечивает извлечение алмазов по всем переделам не менее 85-95% по массе и более 99,5% по стоимости [5-7].

Одной из важнейших проблем, возникающих при работе различных вибрационных установок, является проблема прохождения через резонансные частоты [8]. Традиционный способ решения этой проблемы состоит в подаче на вход системы достаточно больших по величине постоянных управляющих сигналов, формируемых независимо от текущих значений вектора состояния (система управления разомкнутого типа). Типичным преобразователем, обеспечивающим необходимые условия в системе управления питателя, является преобразователь в виде электромагнитного привода (ЭМП) [9].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Компьютерная модель электромагнитного привода реализована в пакете программ MatLab. Пакет программ MatLab можно отнести к числу универсальных пакетов программ, не ориентированных на конкретные прикладные области моделирования технических систем. Важнейшей составляющей MatLab является приложение структурного моделирования динамических систем Simulink. Он интегрирован с MatLab, позволяя включать его алгоритмы в модели и экспортировать результаты моделирования для дальнейшего анализа.

Рассчитаем резонансные частоты для продольных и вертикальных колебаний, которые соответственно будут равны:

$$f_{П,В} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где  $k=(E \cdot F_{П,В})/h$  – жесткость одной рессоры лотка питателя;  $m$  – масса одной рессоры лотка, кг;  $E=2,86 \cdot 10^4$  – модуль упругости кимберлита, МПа;  $F_{П,В}=a \cdot b$  – площадь рабочей поверхности материала, м<sup>2</sup>;  $h$  – высота слоя материала, м;  $a$  и  $b$  – соответственно ширина и длина одной рессоры лотка питателя, м. Следует отметить, что параметры  $a$ ,  $b$ ,  $h$  и  $m$  можно найти в технической документации исследуемого питателя.

Для оценки правильности расчета резонансных частот собираем суммарные одномассовые математические модели, имитирующие продольные и вертикальные колебания лотка, которые представлены на рис. 1 (а) и (б) соответственно.

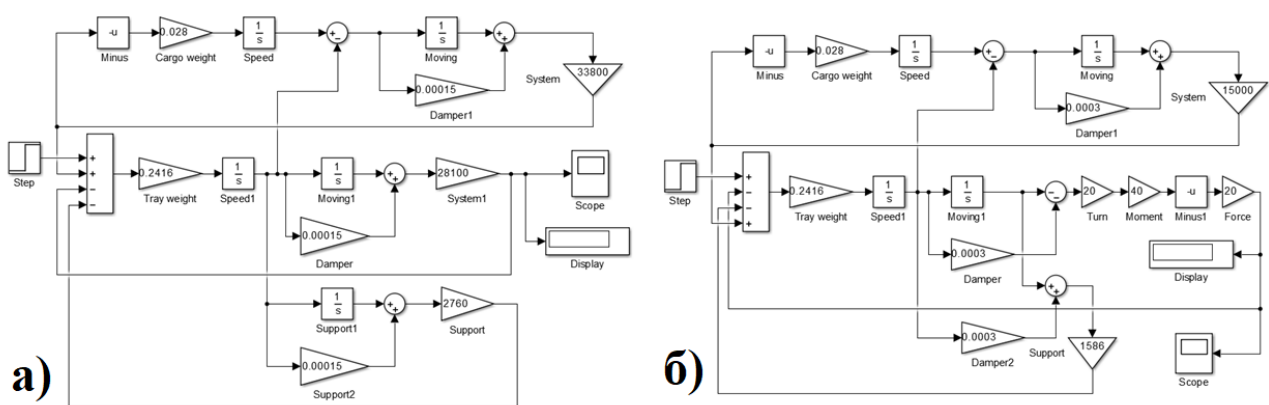


Рис. 1. Математическая модель имитации продольных (а) и вертикальных (б) колебаний лотка питателя

В результате моделирования имеем практически полное совпадение резонансных частот с погрешностью, не превышающей 10%, что допускается при математическом моделировании динамических систем:

$$\Delta f_{П,В} = \frac{f_{П,Врасч} - f_{П,Вмод}}{f_{П,Врасч}} \cdot 100\%.$$

Также на графиках (рис. 2) мы видим, что в начале вибрации частота превышает резонансные значения в несколько раз. По мере продолжительности вибрации происходит затухание частоты. Примерно к 200 секундам времени моделирования осуществляется выход её на резонансное значение.



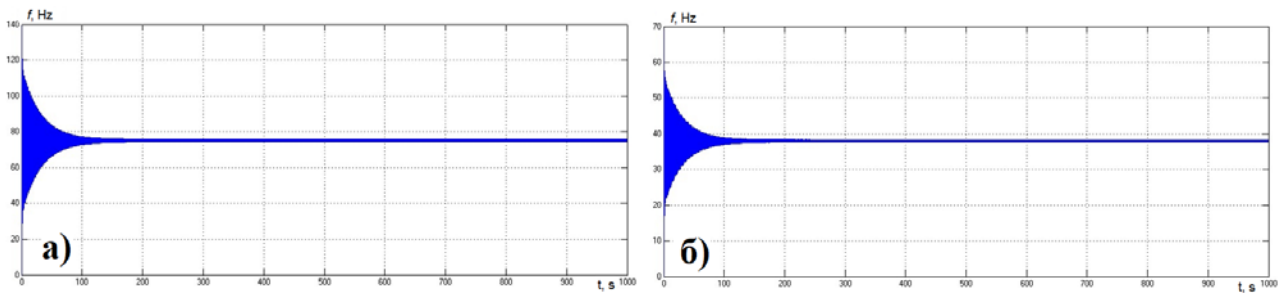


Рис. 2. Графики затухания резонансной частоты вибрации для продольных (а) и вертикальных (б) колебаний

После подтверждения правильности расчета резонансных частот колебаний для оценки перемещения кимберлита по лотку питателя разрабатываем математическую модель электромагнитного привода (рис. 3, а). В результате моделирования на осциллографе (рис. 3, б) мы можем наблюдать значения параметров собственной частоты (а), резонансной частотой (б), величину тягового электромагнитного усилия (с) и момент (д), прикладываемый к электромагнитам.

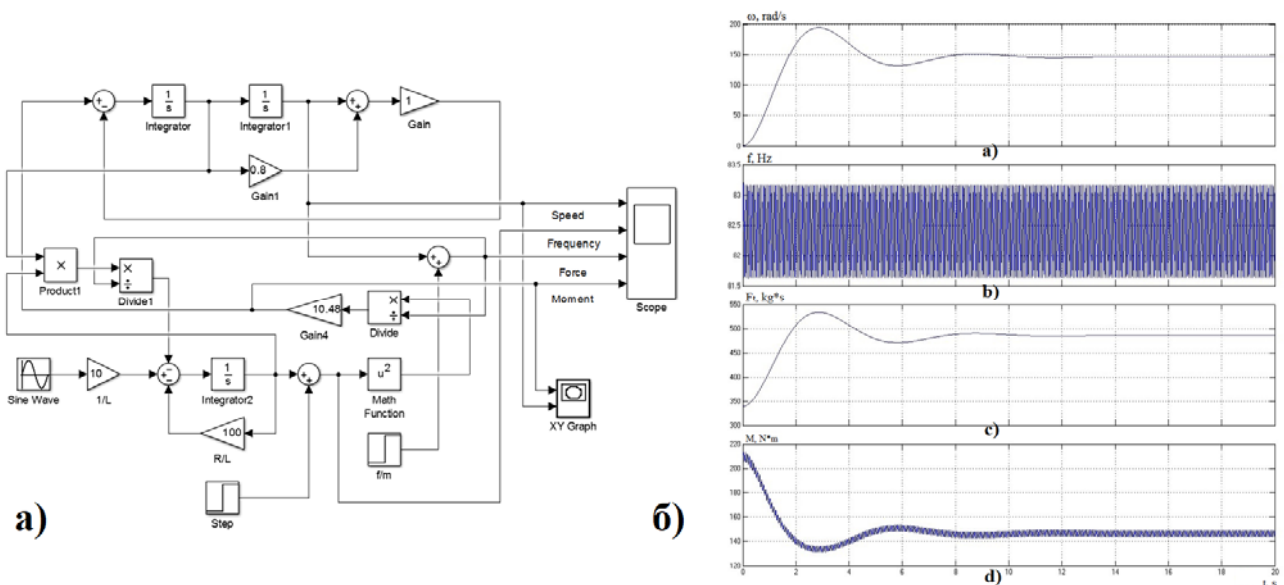


Рис. 3. Математическая модель электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя (а); результаты моделирования электромагнитного привода (б)

Проанализируем эти графики.

В начальный момент времени виден процесс включения ЭМП и дальнейший выход на установившееся значение собственной частоты. Через 14 секунд после запуска частота выходит на своё номинальное значение 146 рад/с,

успешно преодолев барьер резонансных частот. Коэффициент перерегулирования составляет 0,2, а разрегулирования – 0,11, что является допустимым для динамических систем. На графике (b) рис. 3 (б) наблюдаем резонансную частоту колебаний ЭМП питателя, которая колеблется в допустимых пределах от 81,65 Гц до 83,2 Гц, что дает погрешность менее 1 %. На графике (d) рис. 3 (б) показан электромагнитный момент ЭМП, который при пуске достигает величины 214 Нм, а при выходе частоты на номинальное значение снижается до 147 Нм. Отношение пускового момента к номинальному не превышает кратности 2, что является очень хорошим результатом, так как диапазон допустимых значений для ЭМП лежит в интервале от 2 до 3.

Зная максимальные значения таких параметров как частота, тяговое усилие и электромагнитный момент, мы можем определить максимальную мощность ЭМП (Вт), которая потребуется для обеспечения стабильной производительности питателя при перемещении кимберлита, по следующей формуле:

$$P_{\text{МАКС}} = \frac{\omega_{\text{max}} \cdot F_{\text{max}} \cdot M_{\text{max}}}{E \cdot \eta},$$

где  $\omega_{\text{max}}$  – максимальная частота вибрации (по графику (a) рис. 3 (б)), рад/с;  $F_{\text{max}}$  – максимальное тяговое усилие (по графику (c) рис. 3 (б)), кгс;  $M_{\text{max}}$  – максимальный электромагнитный момент (по графику (d) рис. 3 (б)), Нм;  $E=2,86 \cdot 10^4$  – модуль упругости кимберлита, МПа;  $\eta=0,8$  – принимаемый средний КПД вибровозбудителя.

При такой мощности ЭМП выглядит предпочтительнее в качестве привода питателя, нежели альтернативные системы, например, асинхронный двигатель с дебалансом, либо более сложная система «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока – регулируемый дебаланс», которые в зависимости от производительности могут достигать мощности десятков киловатт. Этот выбор будет зависеть от технологического процесса и особенностей системы электроснабжения предприятия.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были произведены теоретические исследования перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации, была определена резонансная частота продольных и вертикальных колебаний лотка питателя. Для решения математических задач был использован пакет программ MatLab. Разработаны математические модели, описывающие перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, сопоставлены расчетные и смоделированные параметры частот, установлена допустимая погрешность. Разработана математическая модель электромагнитного привода, позволяющая определить его мощность и подобрать тип системы электропривода с точки зрения оптимальности для технологического процесса и энергоэффективности электрооборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волотковская, Н. С. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий / Н. С. Волотковская, А. С. Семенов, О. В. Федоров // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2019. – № 3 (78). – С. 52-62.
2. Анализ эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в условиях алмазодобывающих предприятий / А. Н. Егоров, А. С. Семенов, Я. С. Харитонов, О. В. Федоров // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 77-82.
3. Экспериментальное обоснование состава люминофоров для индикации алмазов в условиях рентгенолюминесцентной сепарации кимберлитовых руд / В. А. Чантурия, Г. П. Двойченкова, В. В. Морозов, О. Е. Ковальчук [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 3. – С. 112-120.
4. Механизм и обоснование параметров интенсификации пенной сепарации алмазосодержащего сырья с применением тепловых и электрохимических воздействий / В. В. Морозов, Г. П. Двойченкова, Е. Г. Коваленко, Е. Л. Чантурия [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 2. – С. 119-131.
5. Выбор люминофорсодержащих реагентов-модификаторов для коррекции спектральных характеристик алмазов / В. А. Чантурия, В. В. Морозов, Г. П. Двойченкова, Е. Л. Чантурия [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 4. – С. 99-108.
6. Физико-химические и электрохимические методы модифицирования свойств алмазов и компонентов рудной пульпы при сепарации алмазосодержащих кимберлитов / Г. П. Двойченкова, Е. Л. Чантурия, А. С. Тимофеев, Е. Н. Чернышева // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. – № 2 (48). – С. 238-247.
7. Способ предобогащения алмазоносных россыпей : патент на изобретение 2747286 С1 Рос. Федерация / В. Ф. Монастырский, Г. П. Двойченкова, П. С. Татаринев, Б. И. Мостовой [и др.]; заявитель и патентообладатель Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. – № 2020136666; Заявка от 09.11.2020, опубликовано 04.05.2021. Бюл. № 13. – 8 с.

8. Чичков, Б. А. Способ вибрационного мониторинга роторных машин / Б. А. Чичков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 137-146.

9. Семёнов, А. С. Разработка математической модели электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя / А. С. Семёнов, Я. С. Харитонов, А. Н. Егоров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 123-131.

*Фатхуллина Л. З., Кузнецова Н. П.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

*Аннотация:* В статье рассматривается современное состояние методологической базы для построения информационной модели управления эффективностью энергетической системы Российской Федерации. Авторы исследуют качества разнообразных показателей и типов моделей с точки зрения отражения результатов энергообеспечения и качества управления энергосистемами. В основу авторской методики положены модели взаимосвязи макроэкономических показателей и показателей, характеризующих энергообеспечение и энергопотребление в федеральных округах Российской Федерации, а также алгоритм оценки их совместной динамики. В результате проведенной работы выработаны принципы и требования к информационной модели.

*Ключевые слова:* энергетическая система, информационная система, информационная модель управления эффективностью энергосистемы, модели обеспечения эффективности взаимодействия национальной и региональных энергосистем.

### **Введение**

В энергетике, как и всей экономической системе РФ проходит глубокая модернизация, учитывающая современные процессы информатизации и автоматизации. В частности, на базе единой информационной модели создается новое поколение оперативного информационного комплекса (ОИК). Результатом этой работы станет единый комплекс автоматизированных систем, оперирующих данными в рамках единого информационного пространства. Поэтому весьма актуальным становится проблема включения в подобный комплекс информационных систем, обеспечивающих управление эффективностью энергетической системы в целом и отдельных ее подсистем, в частности.

Рассмотрим некоторые проблемы, требующие в связи с этим своего решения. Изучение проблем эффективности энергосистем разного уровня и использования результатов исследований для создания моделей анализа и

прогнозирования ведется в российской экономической науке давно и достаточно интенсивно [1-10]. Однако высокие темпы трансформации энергетики, как и всей экономики, требуют своего отражения и включения в процессы информатизации отраслевых систем. Остается недостаточно проработанным аспект, связанный с выбором критерия эффективности управленческих решений на национальном (макроэкономическом) и региональном (проектном) уровне. Энергетические системы развиваются в рамках инфраструктурных проектов, основным источником финансирования которых являются инвестиции государства. Поэтому ключевые показатели, характеризующие долгосрочное развитие национальной и региональных энергетических систем, формируются на основе макроэкономической стратегии устойчивого развития национальной экономики. В то же время эффективность конкретных инвестиционных проектов строительства и модернизации региональных энергосистем оценивается с точки зрения возврата затраченных финансовых ресурсов.

Следующий аспект связан с целеполаганием. Устойчивое развитие национальной энергетики невозможно без синхронизации и пропорционального развития региональных систем. Поэтому в информационной модели должны увязываться макроэкономические цели и результаты практической деятельности в регионах, обеспечивающие реализацию поставленных целей.

Важным является вопрос формулирования принципов формирования системы показателей, которые могут быть включены в информационную модель. Например, традиционными для экономической науки последних десятилетий являются подходы к оценке и анализу, которые основаны всецело на показателях «количественного роста» (например, роста показателей ВВП). Несомненно, этот подход требует дополнения, что означает включение в процессы показателей оценки «качественного роста». Заметим, что качественный рост, в конечном счете, приводит к росту производительности труда, который можно измерить по результатам реализуемых в регионах инвестиционных проектов.

Еще одним обстоятельством, которое необходимо рассмотреть и внести уточнения. Это применение трендовых моделей для анализа любого типа процессов. Например, несмотря на часто наблюдаемую тесную связь между ВРП и разнообразными факторными показателями, нельзя забывать о высокой вероятности смены трендов в социально-экономических процессах. Поэтому использование метода экстраполяции для выявления значимых факторов, которые подобраны для корреляционного анализа, на основании, что между ними имеется довольно тесная и прямая связь, часто приводит к ошибочным выводам, которые транслируются в ошибочные управленческие решения. Отсюда следует еще одно важное обстоятельство: необходимо изучить применимость моделей, получаемых в результате экономического анализа, для описания результатов управленческих воздействий.

### **Методика**

Система информационных моделей является базовым элементом информационной системы управления эффективностью энергосистемы РФ. Данная система может быть создана по следующему алгоритму.

Первый этап – это формирование структурной модели показателей, необходимых для описания функционирования подсистемы стратегического управления энергетической системой Российской Федерации в соответствии с программными документами создания подсистемы стратегического управления энергетической системой РФ – увязывать параметры развития энергосистемы в целом с макроэкономическими показателями социально-экономической системы РФ и регионов. На втором этапе построения системы информационных моделей необходимо сформировать статистически обеспеченный информационный массив для анализа трендов динамики показателей. Третий шаг – это экономический анализ взаимосвязи выбранных показателей по предмету исследования. На четвертом шаге проводится разработка и анализ качества моделей управления в системе обеспечения эффективности функционирования энергосистемы.

Сформулируем требования к информационной модели обеспечения эффективности функционирования энергетической системы Российской Федерации: соответствие динамике развития и функционирования

энергетической системы Российской Федерации; согласование характеристик энергетической системы с макроэкономическими показателями экономики Российской Федерации и ее регионов; интеграция в единую систему поддержания эффективности функционирования энергетической системы Российской Федерации и ее регионов с эффективностью инвестиций в обеспечивающие инфраструктурное развитие проекты; решение практически значимых проблем, в частности, выравнивание дисбалансов в развитии региональных энергетических систем.

### **Анализ ситуации**

Рассмотрим пример. Для создания информационной базы анализа используем данные наблюдений Росстата по федеральным округам Российской Федерации [11]. Структура исследуемой информационной базы определяется показателями, в нее включенными. Традиционно на макроэкономическом уровне выберем показатель валовой региональный продукт (ВРП). Для количественной оценки процессов модернизации выберем показатель «Инвестиции в основной капитал», который регулярно регистрируется и публикуется в ежегодных отчетах Росстата. Далее выберем показатель, с помощью которого можно оценить объективные изменения в экономике регионов – «Потребление электроэнергии в Российской Федерации», ежегодно регистрируемый, как по регионам, так и по видам деятельности.

Исследуем характер влияния фактора  $X$  (потребление электроэнергии) и результирующей переменной  $Y$  (ВРП) (рис.1). Наблюдения позволяют сделать вывод, что количественные оценки интенсивности связи между указанными переменными колеблются в интервале «не просматривается» до «связь высокая». Сравнения графиков по федеральным округам выявляет разброс более, чем в 3 раза интенсивности влияния значений энергопотребления на рост макроэкономических показателей регионов. Это информация о качестве управления, которую можно получить при анализе.

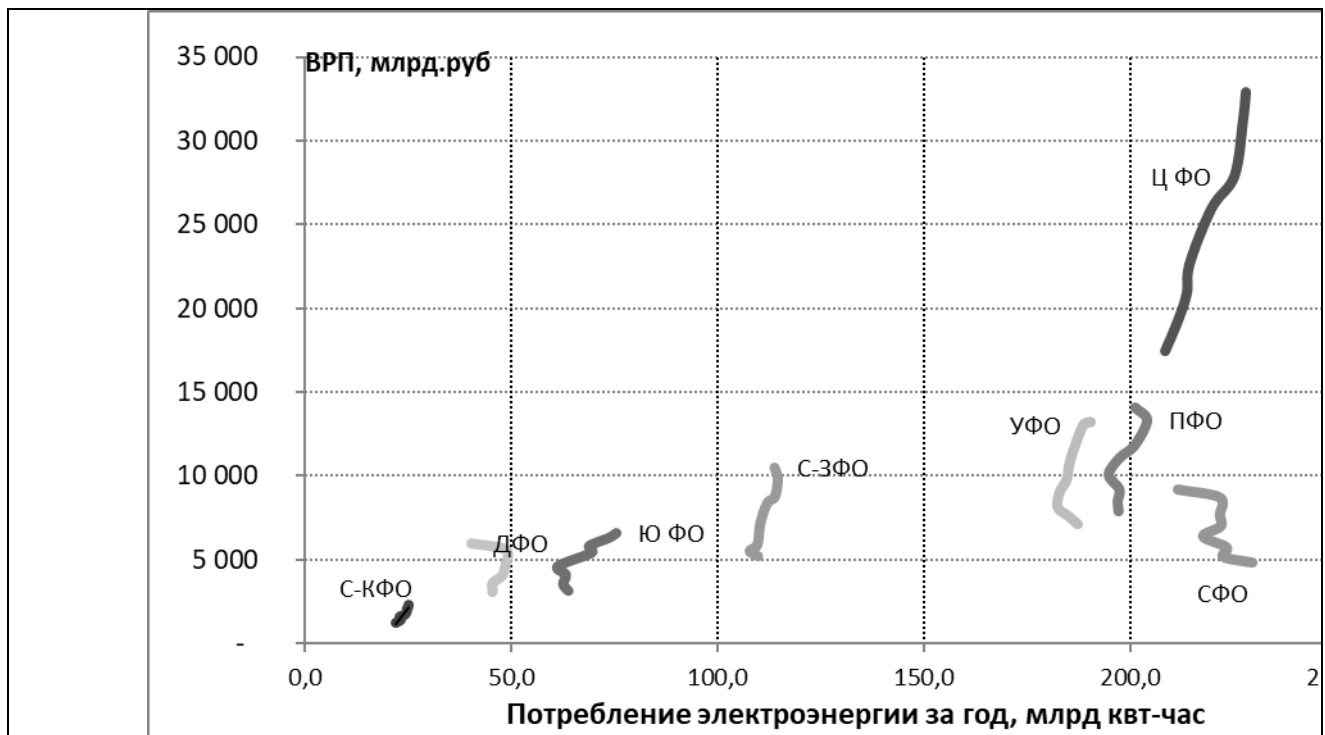


Рис.1. Зависимость ВРП и потребления электроэнергии в ФО РФ

Второй пример – показатель электровооруженности труда в регионах, т.к. он является важнейшим материально-техническим фактором повышения производительности труда.

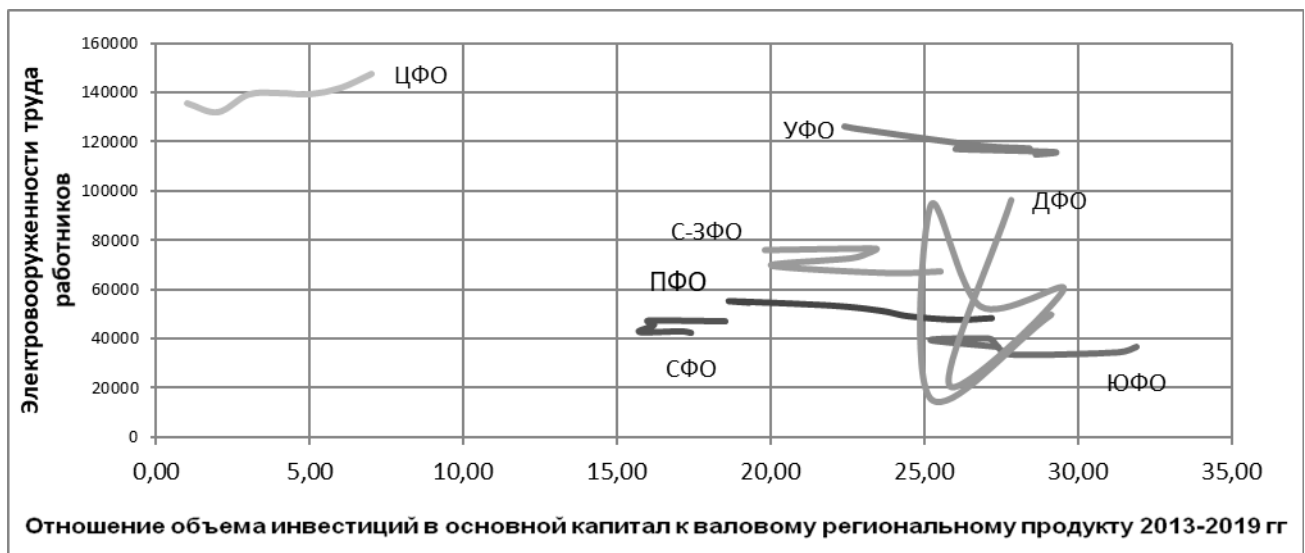


Рис.2. Зависимость электровооруженности труда работников и доли объема инвестиций в основной капитал к ВРП

Графики показывают, что, во-первых, в разных федеральных округах РФ одинаковые доли инвестиций дают разный результат в электровооруженности (рис.1); во-вторых, рост инвестиций часто не ведет к росту электровооруженности (рис.2). Особенно следует отметить: необходимо повышать качество моделей с точки зрения их пригодности для управления.



## **ВЫВОДЫ**

Систему моделей, разрабатываемую по предложенному алгоритму, можно использовать как инструмент государственного регулирования для разработки стратегического целеполагания и индикативного планирования в энергообеспечивающих, промышленных и прочих комплексах экономики регионов. А также создается возможность перейти к решению практически значимых проблем. Одной из таких проблем является наличие дисбалансов регионального развития.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Богачкова Л.Ю., Хуршудян Ш.Г. Особенности динамики электропотребления регионов РФ в зависимости от типов их энергоэкономического развития// Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – Пенза, 2017.– № 4. –С. 4–16.
2. Волкова А.Г., Воронцова И.Н., Артеменко В.Б. Критерии и индикаторы сбалансированного развития региона// Регион: Системы, экономика, управление. – Москва,2016. – №4 (35)– С. 79–84.
3. Волконский В.А., Кузовкина А.И. Анализ и прогноз энергоемкости и энергоэффективности экономики России // Проблемы прогнозирования. – Москва,2006. – №1. –С. 53–61.
4. Домников А.Ю. Управление развитием региональной электроэнергетики в условиях экономических дисбалансов / А. Ю. Домников, Л. В. Домникова. – Екатеринбург: ФГАОУ ВО УрФУ, РФФИ, 2017. – 360 с.
5. Картавенко Н.А. Сравнительный анализ взаимосвязи энергоемкости ВРП и уровня развития экономики российских регионов // Евразийский Союз Ученых. Экономические науки. –Москва, 2015. – № 6-1 (15). –С.59–63.
6. Кокшаров В.А. Комплексная методика анализа энергоемкости валового регионального продукта // Вестник УРФУ. Серия экономика и управление. – Екатеринбург,2014.– №2. – С. 26–36.
7. Суворов А.В., Михеева И.Н., Иванов В.Н. Система прогнозных расчетов макроэкономических показателей регионов // Проблемы прогнозирования. – Москва, 2021. – № 3 (186). – С. 18–28.
8. Хабибрахманов Р.Р. Моделирование влияния энергетического фактора на динамику изменения валового внутреннего продукта России // Политематический сетевой электронный научный журнал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/58>(дата обращения: 12.07.21).
9. Хисамова А.И., Третьякова Е.А. Прогнозирование потребления электроэнергии на основе показателей экономического развития региона // Актуальные проблемы экономики и права. –Казань, 2011. – № 2. –С. 130–137.
10. Шаркова А.В., Васильева О.Е. Региональная структура потребления электроэнергии: оценка и особенности // Оценка инвестиций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esm-invest.com/ru/Regional-structure-of-electricity-consumption-assessment-and-features>(дата обращения: 02.08.21).
11. Российский статистический ежегодник, 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gks.ru> (дата обращения: 20.07.21).

*Миловзоров Д. Г.<sup>1</sup>, Галиев А. Л.<sup>2</sup>, Ахметов Ш. Р.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет

<sup>2</sup>Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета

## **КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОГО ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ФЕРРОЗОНДОВОГО ГРАДИЕНТОМЕТРА С ПРОГРАММНО УПРАВЛЯЕМОЙ БАЗОЙ**

*Аннотация:* Рассматриваются конструктивные особенности феррозондового градиентометра с программно управляемой базой. Представлены варианты форм корпуса, выявлены их достоинства и недостатки. Рассмотрен испытательный стенд для проведения тестирования и экспериментальных исследований градиентометра. Приведены отдельные результаты предварительных экспериментальных исследований, которые показали, что градиентометр отвечает техническим условиям не требует существенных доработок.

*Ключевые слова:* феррозондовый трехкомпонентный градиентометр, программно управляемая база, трехосевые феррозондовые преобразователи.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Феррозондовый трехкомпонентный градиентометр – это информационно-измерительная система, основой которой являются два или более ортогональных трехкомпонентных магниточувствительных преобразователя, расположенных на одной оси на базовом расстоянии и предназначенный для регистрации как разностей измеряемых проекций, так и разностей модуля вектора индукции (напряженности) магнитного поля. Градиентометр может применяться для измерения параметров неоднородности магнитного поля на определенном участке.

В частности, градиентометр применяется для поиска мест залегания магистральных трубопроводов, а также определения мест резких перепадов модуля вектора магнитной индукции, характеризующих наличие различных дефектов или нарушение целостности изоляции трубопровода.

### **1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГРАДИЕНТОМЕТРА**

Рассматриваемый в данной работе феррозондовый градиентометр с программно управляемой базой позволяет получить данные измерений на

различных базах (расстояниях между группами ортогональных феррозондовых датчиков), т.к. величина базы градиентометра влияет на разрешающую способность измерений [1, 2]. Чем меньше база градиентометра, тем меньше по размеру дефекты могут быть обнаружены и проанализированы, но почувствовать эти дефекты можно лишь при малых удалениях от объекта. Большая база градиентометра отражает интегральные (суммарные) характеристики объекта, заметить которые можно с больших расстояний.

Возможны различные варианты построения и конструктивного исполнения градиентометров с феррозондовыми датчиками [3-5]. При разработке и создании трехэлементного трехкомпонентного феррозондового градиентометра принимались во внимание следующие требования:

- проектируемый градиентометр должен иметь возможность работы как при носимом (пешем) обследовании, так и иметь подвес для крепления к беспилотному летательному аппарату (БПЛА) и/или иному носителю;

- иметь достаточную прочность для сохранения целостности корпуса и внутреннего оборудования в рабочем состоянии при возможных ударах о ветки, стволы деревьев, землю, камни;

- градиентометр должен сохранять работоспособность в широком диапазоне температур окружающей среды, а также при различных атмосферных явлениях (дождь, туман, снег).

В качестве материала корпуса был выбран стеклопластик, как обладающий приемлемой прочностью при малом весе. Стеклопластик не вносит искажений в магнитное поле, а значит, не вносит погрешностей в результаты измерений.

В качестве несущего элемента, фиксирующего компоненты градиентометра внутри корпуса было изготовлено П-образное шасси из алюминия, на котором закрепляются трехосевые феррозондовые преобразователи (ТФП) (рис. 1).

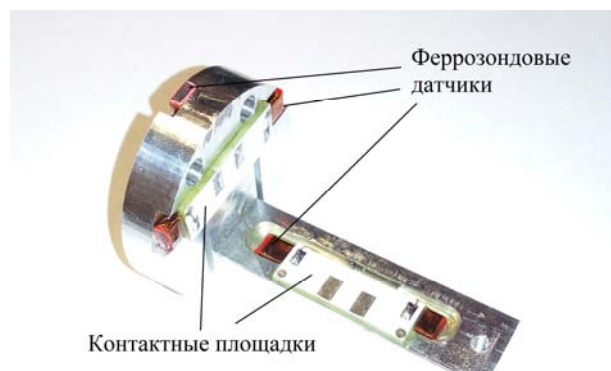


Рис. 1. ТФП в сборе

С наружной части шасси установлены разъемы подключения антенн GPS, Bluetooth, питания и обмена информацией. Так же предусмотрена петля для подвеса (крепления) градиентометра к БПЛА. Таким образом, несущим элементом является шасси (рис. 2, а).



а)

б)

Рис. 2. Внешний вид:

*а – фрагмента шасси с закрепленным ТФП; б – собранного градиентометра*

Наружный цилиндрический корпус служит защитой от атмосферных явлений и механических повреждений, возникающих в процессе эксплуатации. Внешний вид собранного градиентометра представлен на рис. 2, б.

## 2. ИСПЫТАНИЯ ГРАДИЕНТОМЕТРА

Для испытания градиентометра был разработан и создан испытательный стенд, схема которого приведена на рис. 3, а. Стенд изготовлен на основе стальной трубы диаметром 219 мм, толщиной стенки 10 мм и длиной 7 метров (рис. 3, б). На трубе в трех точках нанесены искусственные дефекты изоляции

путем сварки контактных групп, соединенных медным проводником через эквивалент сопротивления земли (ЭСЗ) и механические коммутаторы с шиной заземления.

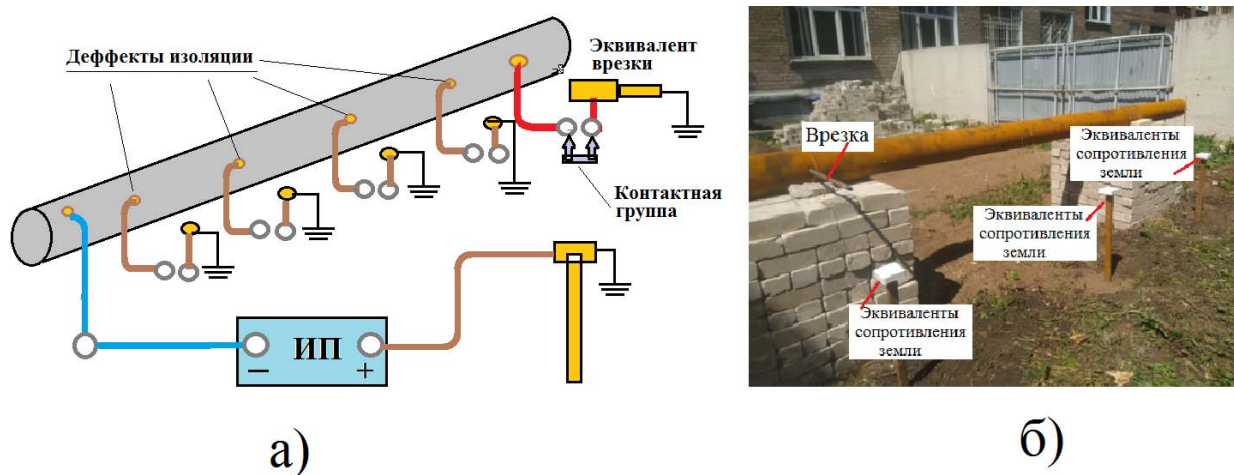


Рис. 3. Испытательный стенд  
а – схема; б – внешний вид

С помощью отрезка стальной трубы диаметром 24 мм, прикрепленной к большой трубе путем электросварки, осуществляется имитация врезки.

В ходе проведения экспериментальных исследований проводились измерения градиента вектора магнитной индукции в двух режимах: с малой базой – база меньше 10 см и с большой – база больше 160 см. Максимальная высота подъема градиентометра относительно нижней «тройки» феррозондовых датчиков от исследуемой трубы составляла 2м, минимальная высота – 0,4 м. Испытания показали эффективность изменения базы при поиске малых источников искажения магнитной обстановки вокруг стальной трубы.

На рис. 4 показана схема движения градиентометра во время проведения испытаний. Проведенные испытание были в основном посвящены предварительным испытаниям градиентометра, без дополнительной обработки результатов измерений программными средствами.

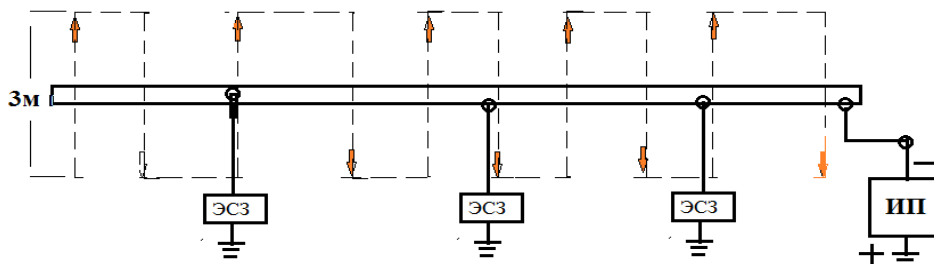


Рис. 4. Схема движения градиентометра во время испытательных работ

На рис. 5 показан скриншот с экрана компьютера, управляющего работой градиентометра в режиме испытаний с большой базой.



Рис. 5. Регистрация дефектов трубы при проведении измерений

Расстояние от трубы до нижней тройки феррозондовых датчиков более 2 метров. Было установлено, что градиентометр определяет место врезки и отмечает прохождение над трубой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе пробных испытаний разработанный градиентометр показал себя отвечающим техническим условиям, не требующим существенных доработок.

Изготовленный градиентометр является успешной разработкой, позволяющей регистрировать дефекты изоляции трубопровода, несанкционированные врезки, а также отработать основные элементы

взаимодействия с оператором, подготовить узлы крепления к БПЛА (автономному носителю), выявить возможные неочевидные моменты, способные вызвать проблемы при промышленной эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков, Т.Н. О предельной глубине обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще полупроводящей среды / Т. Н. Щербаков, М. А. Анцелевич, Д. Н. Удинцов. – Электротехника, №6, 2005. – С. 48-52.
2. Milovzorov, D. G. Multielement triaxial fluxgate gradiometer with variable base / D. G. Milovzorov, A. L. Galiev, Sh. R. Ahmetov. The international scientific and practical conference materials. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: publishing complex USATU, 2020. – Pp. 258-261.
3. Звездинский, С. С. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов / С. С. Звездинский, И. В. Парфенцев. Спецтехника и связь. М, 2009, №1. – С. 16-29.
4. Щербаков, Г. Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. Для криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом / Г. Н. Щербаков. М.: Арбат-Информ, 1998. – 127 с.
5. Milovzorov, D. G. Mathematical modeling of fluxgate magnetic gradiometers / D. G. Milovzorov, V. Kh. Yasoveev. Optoelectronics Instrumentation and Data Processing, 2017, vol. 53, № 4, Pp. 388-394.

*Зацаринная Ю. Н., Ретьев Е. В.<sup>1</sup>, Гайнуллин Р. Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет

### **РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ – ТРЕНД ТРАНСФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ**

*Аннотация:* В статье рассматриваются пути развития распределенной генерации в России. Особенностью современного этапа развития российской энергетики является все более широкое использование возобновляемых источников энергии, цифровых финансовых технологий, появление просьюмеров. Современные требования к энергосистемам требуют высокого качества электроэнергии, надежности ее функционирования и удобства инфраструктуры. Под влиянием современных тенденций трансформация энергетики для России необходима и логична. Распределенная энергия - это современный тренд и залог стабильного технологического роста электроэнергетической отрасли Российской Федерации. Особое внимание авторы уделяют инструментам поддержки и стимулирования развития распределенной генерации и рекомендациям по правовому регулированию топливно-энергетического комплекса для России.

*Ключевые слова:* *распределенная генерация, возобновляемая энергетика, policy, incentive measures*

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетика — это базовая отрасль экономики, обеспечивающая электроэнергией и тепловой энергией потребности промышленности и населения. Устойчивое развитие и надежная работа электроэнергетики определяет энергетическую безопасность любой страны и является важным фактором ее успешного развития.

Самой главной составляющей энергетической системы является ее надежность и эффективность, при этом стабильное функционирование и развитие невозможно без постоянной модернизации генерирующего оборудования, снижения удельных расходов топлива на производство электрической и тепловой энергии, ввода новых технологий. В любой стране мира именно развитие энергетики отдается первостепенное значение. Именно такой подход позволяет энергетическому сектору работать с минимальными финансовыми потерями.

Стремительное увеличение потребления электроэнергии в развивающихся странах служит катализатором роста энергетического сектора. Это представлено на рисунке 1 [1]. Снижение потребления электроэнергии в 2020 году связано с пандемией Covid 19, но в 2021 году прогнозные значения потребления говорят о том, что спрос достигнет уровня потребления 2019 года.

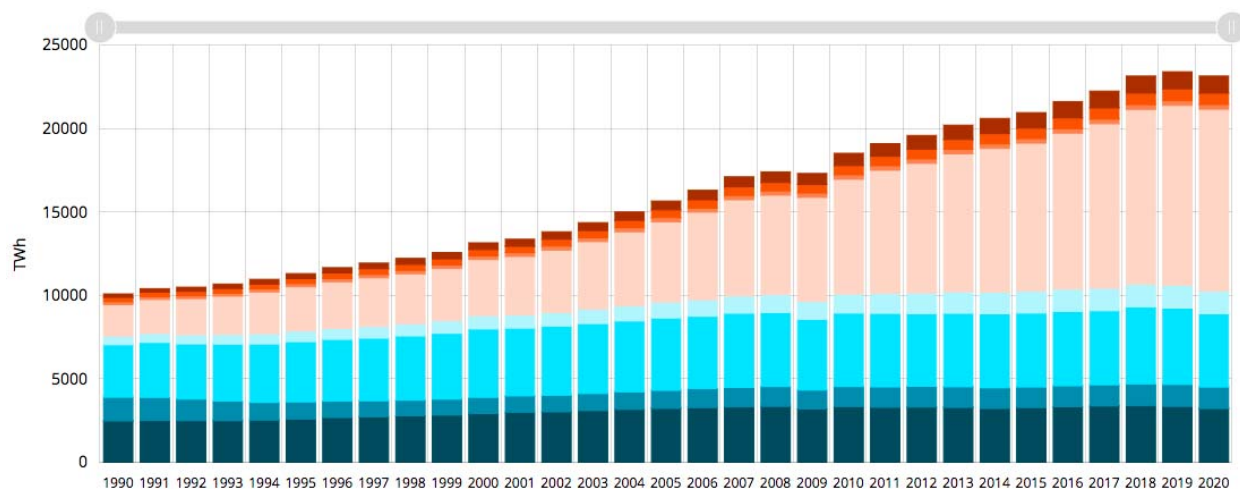


Рис. 1. Рост потребления электроэнергии в мире



Мировая научно-техническая политика в энергетическом секторе направлена на повышение эффективности производства, создание условий для развития энергосистемы и поддержания энергетической, промышленной и экологической безопасности. Для увеличения экологической безопасности в Европе разработана дорожная карта 2050 направлена на сокращение выбросов парниковых газов, путем интеграции распределенных и возобновляемых источников энергии [2]. Доля возобновляемых источников энергии в общем потреблении мировых стран показывает неуклонный рост несмотря на пандемию Covid 19. Россия тоже идет по похожему пути, несмотря на то, что в странах Европы развитие ВИЭ началось в 2000-х годах, в России же, первые шаги по развитию ВИЭ государством были предприняты в 2009 году. Было принято распоряжение Правительства РФ, в 2013 году была принята государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики»<sup>1</sup>, согласно которой до 2020 года в стране должно быть введено 6,2 ГВт электрических станций на возобновляемых источниках. В 2019 году принят федеральный закон № 471 от 27 декабря 2019 года «О внесении изменений в Федеральный закон Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации». Увеличение доли возобновляемых источников энергии в мире представлено на рис. 2 и рис. 3.

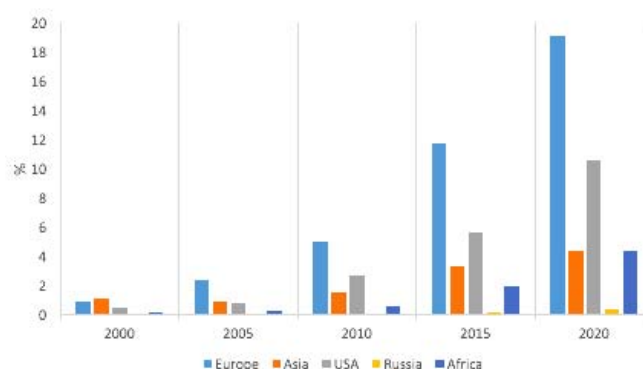
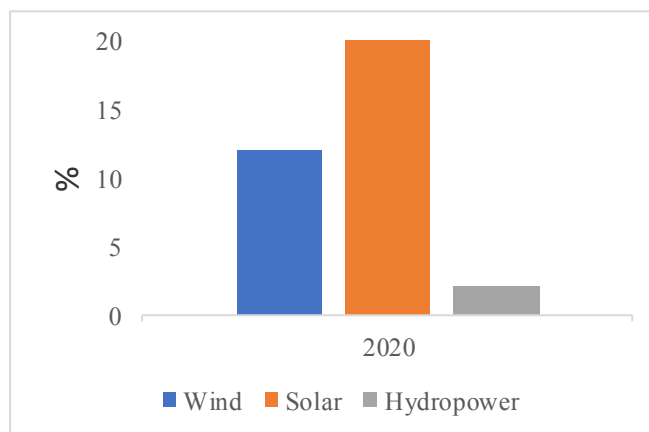


Рис. 2. Доля возобновляемых источников в производстве электроэнергии



*Рис. 3. Увеличение доли возобновляемых источников в 2020 году в мировом производстве электроэнергии*

Распределенная энергетика, являющаяся на сегодняшний день глобальным трендом, – это один из возможных способов перехода от традиционной централизованной организации как мировых энергосистем, так и Российской Федерации к новым технологиям, возобновляемым источникам и практикам применения автономных индивидуальных электростанций [3]. Происходит это из-за существенных минусов централизованного снабжения: большие потери тепла: от 15 до 30% передаваемых нагрузок (норма 15%); большие затраты на прокладку теплотрасс, линий электропередач, кабельных линий; отключение множества потребителей при проведении ремонта или ликвидации аварии; отрицательное влияние на возможности энергосбережения.

Тенденция в мире такова, что на данный момент большинство развитых стран в последнее время активно начали развивать и переходить на децентрализованную модель энергетики, основанной, в главном случае, на распределенной генерации. Данная модель подразумевает применение, как возобновляемых источников (солнце, ветер), так и традиционного вида топлива, природного газа (микротурбинные и малые газотурбинные, газопоршневые установки) [4].

## 1. СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РОССИИ

При переходе на данную модель можно выделить три основных сценария, которые и определяют судьбу энергетической политики страны в будущем. Данные сценарии можно описать, как негативный, консервативный и позитивный.

Рассмотрим каждый из возможных сценариев и их последствия поподробнее.

Негативный сценарий подразумевает, что распределенная генерация просто не найдет свое место в России. На сегодняшний день её доля составляет всего лишь 5-10%, что в 2-3 раза меньше, чем у развитых стран. И все это на фоне того, что сейчас наблюдается повышение интереса в строительстве данных объектов. Однако их мощности не найдут должного места в перспективном развитии энергетической системы страны. К тому же при внедрении данного метода в действующую систему могут возникнуть проблемы технического характера: нехватка оборудования, понижение качества электроэнергии, а также сложности, которые могут возникнуть у оперативно-диспетчерского персонала. Так же стоит отметить тот фактор, что модернизация действующих станций или строительство более крупных объектов будет приоритетнее в данном сценарии, нежели строительство проектов на основе распределенной генерации [5]. Отсутствие интересов у государства, нехватка инвестиций и субсидий, ориентированность на старые технологии и неприятие новых, отсутствие технического регулирования на законодательном уровне, совокупность всех вышеперечисленных факторов приведет к тому, что распределенная генерация, как новый тренд, попросту не приживется в России.

Что же касается консервативного подхода, то здесь не все так однозначно. Данный сценарий предусматривает совокупность как развития централизованного электроснабжения, так и поддержку распределенной генерации. Данная модель наиболее реалистичная, поскольку рынок не готов к

масштабной переделке. Для осуществления данного сценария необходимо интегрировать децентрализованные части в централизованную систему, обеспечивая надежное функционирование в едином целом. Данный подход выгоден, как для централизованных систем, за счёт резервирования мощностей за счёт распределенных источников, так и для предприятий, имеющих эти самые источники, так как последние смогут получать прибыль за продажу излишек [6]. Данный сценарий привлечет инвестиции, направленные на увеличение установок по распределенной генерации, но все же основной вектор развития энергетической политики страны будет направлен на традиционные крупные электростанции.

Позитивный сценарий благоприятнее всех скажется на развитии распределенной генерации в России. Перед страной встанет вопрос – либо модернизировать и реконструировать действующие крупные станции, что сильно ударит по бюджету страны, либо взять курс на развитие распределенной генерации, снизив затраты на переделку действующих станций. Данный сценарий позволит снизить затраты, как на развитие сетевого комплекса, так и на действующие станции. Также распределенная энергетика поспособствует регулированию цен на электроэнергию, за счёт выбора поставщика, повышению энергоэффективности и в целом будет соответствовать “зеленой энергетике” за счёт использования станций, основанных на ВИЭ [7]. Выбранный вектор развития по распределенной генерации позволит привлечь новый инвестиционный поток, что благотворно скажется на строительстве новых объектов генерации, а также электрифицировать удаленные объекты, к которым невозможно протянуть ЛЭП.

Таким образом, были проанализированы и описаны три сценария развития распределенной генерации в России. На данный момент курс развития энергетического комплекса представлен в докладе «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года», где внимание направлено на поэтапный переход на “зеленую энергетику” [8]. Поэтому можно предположить, что Россия пойдет по консервативному или позитивному сценарию развития.

На сегодняшний день развитие энергетического комплекса Российской Федерации определяется рядом действующих нормативно-правовых актов — это Федеральные законы №35-ФЗ от 26 марта 2003 г. «Об электроэнергетике» и № 190-ФЗ от 27 июля 2010 г. «О теплоснабжении», распоряжение Правительства РФ №1-р от 8 января 2009 г., постановление Правительства РФ № 823 «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики» от 17 октября 2009 г., а также генеральная схема размещения объектов электроэнергетики и энергетическая стратегия России на период до 2030 г. и ряд других. Несмотря на это для осуществления сценариев развития энергетического комплекса РФ, учитывающих применение объектов распределенной генерации в том числе и от ВИЭ [9], действующих на данный момент нормативно-правовых актов недостаточно. Возникает необходимость создания новых нормативно-правовых документов и принятие ряда мер, учитывающих особенности каждого из предложенных нами сценариев развития распределенной генерации.

## 2. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РОССИИ

Негативный сценарий развития предполагает незаинтересованность в объектах распределенной генерации, как крупных потребителей, так и государства в целом, из-за сложностей и барьеров, в том числе и технического характера, возникающих в процессе их реализации [10]. В виду этого, необходимо на законодательном уровне предпринять ряд мер с целью увеличения привлекательности и доступности данных технологий для крупных потребителей. А именно:

- 1) Проводить сравнительный анализ проектов по модернизации и строительству объектов традиционной крупной энергетики с альтернативой в форме развития малых распределенных источников электроэнергии и интегрировать соответствующие проекты в механизмы оптового рынка

электроэнергии и мощности, тем самым повысить информированность и заинтересованность потребителей в объектах РГ;

2) Уменьшить таможенные пошлины на зарубежное оборудование, необходимое для строительства новых объектов распределенной генерации;

3) Стимулировать инвестиции не только на создание рынка отечественных технологий распределенной генерации, но и в научные исследования и разработки в этой области. Для этого необходимо:

- Обеспечить финансирование научных исследований в области создания технически сложного оборудования, таких как газовые и ветротурбины;

- Стимулировать создание испытательных лабораторий и сертификационных центров, нацеленных на уменьшение бюрократических барьеров в процессе проведения проверок и тестирования разработанного оборудования, и их дальнейшей сертификации;

- Стимулировать возможность экспорта отечественного оборудования на массовый рынок, предоставляя крупным производителям экспортные субсидии и кредиты;

4) Изучить зарубежный опыт в области развития распределенной когенерации и разработать собственную стратегию развития данной области, соответствующую условиям РФ. Предпринять меры экономического стимулирования, направленные на развитие когенерации и тригенерации. [11] Не финансировать проекты строительства котельных, направленных на получение только тепловой энергии путем прямого сжигания топлива. По возможности модернизировать старые котельные. [12]

Проведение вышеперечисленных мер позволит осуществить политику развития инновационных технологий малой распределенной энергетики учитывая интересы в первую очередь отечественных производителей.

Для дальнейшего развития распределенной генерации в условиях РФ при консервативном сценарии её развития необходимо принятие новых нормативно-правовых документов, определяющих единое скоординированное

развитие централизованной и малой распределенной электроэнергетики России, а именно:

1) Ввести в основное законодательство РФ терминологию и определения малой распределенной энергетики;

2) Разработать и принять ряд соответствующих нормативно-правовых актов для присоединения объектов РГ к действующим сетям, снимающие существующие барьеры и ограничения, проявляющиеся при строительстве новых объектов РГ, путем упрощения процесса ввода в эксплуатацию потребителями собственной генерации. Обеспечить её параллельную работу с централизованной сетью;

3) В части формирования механизмов ценообразования на услуги по выдаче и продаже излишков электроэнергии в централизованную сеть объектами РГ необходимо внести поправки в утвержденные Постановлением Правительства РФ № 109 от 26 февраля 2004 г. «Основы ценообразования в отношении электрической и тепловой энергии в Российской Федерации» и утвержденные Постановлением Правительства РФ № 861 от 27 декабря 2004 г. «Правила недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг»;

4) В части формирования условий снабжения газом объектов малой генерации потребуются изменения в Постановлении Правительства Российской Федерации № 1021 от 29 декабря 2000 года «О государственном регулировании цен на газ и тарифов на услуги по его транспортировке на территории Российской Федерации», а так же в «Правила поставки газа в Российской Федерации», утвержденные Постановлением Правительства Российской Федерации № 162 от 5 февраля 1998 г., направленные на создание механизмов, обеспечивающих возможность для инвесторов заключать долгосрочные договоры на поставку газа для реализации проектов РГ.

Помимо разработки и утверждения вышеперечисленных нормативно-правовых документов, необходимо принять меры по техническому регулированию и экономическому стимулированию выдачи в сеть избыточной

электроэнергии [13], вырабатываемой потребителями, имеющими собственные источники генерации в том числе на основе ВИЭ, вторичных энергоресурсов или ископаемого топлива в режиме когенерации и тригенерации [6], в целях компенсации потерь в электрических сетях, а также стимулировать покупку энергосбытовыми компаниями этой электроэнергии по цене не ниже покупки потребителем из сети;

В случае развития распределенной генерации по позитивному сценарию в дополнение к вышеизложенным необходимо принять следующие меры:

1) Рассмотреть вопросы снятия препятствий и ограничений, затрудняющих развитие малой распределенной энергетики и когенерации [14]. В особенности снять запрет на совмещение деятельности по передаче и производству электроэнергии на объектах РГ мощностью до 25 МВт, для энергоснабжения удаленных потребителей за счет строительства в непосредственной близости от них этих самых объектов;

2) Разрешить объектам малой генерации мощностью 25 МВт работать на розничном рынке электроэнергии, а также снять ограничения по обязательной работе на оптовом рынке электроэнергии генерирующих установок мощностью 25 МВт и выше, внесением поправок в п.5. статьи 36 ФЗ № 35 «Об электроэнергетике», тем самым предоставляя право самостоятельного выбора работы либо на оптовом, либо на розничном рынках;

3) Ввести понятие муниципальной схемы электроснабжения и установить на законодательном уровне обязательность их разработки с учетом развития распределенной и возобновляемой энергетики и когенерации, путем внесения поправок в постановление Правительства Российской Федерации от 17 октября 2009 г. № 823 «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве основных факторов, влияющих на развитие распределенной энергетики в мире можно выделить: высокую цену топлива,



заинтересованность стран в снижении выбросов, небольшая еденичная мощность установок, ввод которых не требует высоких капитальных затрат, неисчерпаемость и доступность энергоресурсов для станций, работающих на возобновляемых источниках энергии; политическая договоренность стран о развитии “ . Развитие технологий аккумулирования энергии будет способствовать ускорению энергетического перехода к распределенной энергетике.

Государственная поддержка жизненно необходима для развития распределенной энергетики в Российской Федерации. Развитие технологий возобновляемой энергетики и распределенной генерации без господдержки будет сильно замедленно.

Сроки окупаемости объектов распределенной генерации на базе возобновляемых источников равны сроку их эксплуатации, поэтому, для развития в масштабах страны, роль государства и ее поддержки имеет жизненно важное значение. Одновременно с вводом новых мощностей распределенной энергетики будет внедрение цифровых подстанций, развитие технологий Smart Grid и реформирование рынка электроэнергии и законодательства. Наряду с созданием систем распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии, так и на базе углеродного топлива крупных энергосистем на основе НВИЭ будет развиваться и централизованные энергосистемы. Их соотношение будет продиктовано экономическими потребностями и корректировкой планов развития каждой страны.

Основными технологиями повышения конкурентоспособности централизованной энергетики, сдерживающими развитие распределенной энергетики, являются технологии комбинированной выработки энергии, применение энергоэффективного оборудования, использование энергосберегающих устройств, внедрение блоков на парогазовом цикле, развитие технологий в ядерной энергетике (реакторы на быстрых нейтронах), термоядерная энергетика.

Тем не менее, мы можем сделать вывод, что распределенная генерация будет развиваться на территории Российской Федерации. Современный мир постепенно уходит от углеродных видов топлива, Россия тоже идет по этому пути, хотя и очень медленно. Так, например, использование СЭС и ВЭС найдет свое место в южных частях страны, а ГТУ малой мощности, микротурбины и газпоршневые установки в северных регионах страны, в частности на добывающих месторождениях и у промышленного потребителя. Курс на децентрализацию энергосистем уже начался. Так в докладе «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» уже есть упоминания о возобновляемой энергетике, а это значит, что в перспективах страны есть курс на применение ВИЭ, неотъемлемой частью которой может являться распределенная генерация.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Global Energy Trends - 2021 Edition [Electronic resource] / Enerdata. — 2021. — Mode of access: <https://www.enerdata.net/publications/reports-presentations/world-energy-trends.html>.
- [2] Sumper A. Micro and Local Power Markets. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2019. — 272 p.
- [3] Распределенная энергетика в России: потенциал развития / А. Хохлов, И. Мельников, Ф. Веселов и др. — М.: Центр энергетики Московской школы управления Сколково, 2018. — 89 с.
- [4] A. Hirsch. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues / A. Hirsch, Y. Parag, G. Josep // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 90. P. 402-411.
- [5] D.S. Balzamor. Analysis of the possibility of modernization of the state district power station by building the combined cycle plant / D.S. Balzamor, E.Yu. Balzamova, V.V. Bronskaya, T.V. Ignashina, O.S. Kharitonova // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. 042100.
- [6] Y.N. Zatsarinnaya. Solution for renewable future / Y.N. Zatsarinnaya, A.G. Logacheva, R.N. Gainullin, S.F. Alekseeva, D.I. Amirov // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124. 04010.
- [7] S. A. Eroshenko. Renewable energy sources for perspective industrial clusters development / S. A. Eroshenko, V. O. Samoilenko and A. V. Pazderin // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2016. Vol. 1. P.821.
- [8] Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс] / Минэнерго — 2020. — Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
- [9] S. Eroshenko. D. Machine learning techniques for short-term solar power stations operational mode planning / S. Eroshenko, A. Khalyasmaa, D. Snegirev // E3S Web of Conferences. 2018. Vol.51. 02004.
- [10] E.Y. Balzamova. Modernization of the scheme for the delivery of thermal power from the state district power station / E.Y. Balzamova, D.S. Balzamor, V.V. Bronskaya, O.S. Kharitonova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol.734. 012194.

[11] Taymarov M.A. Efficiency of application of various layout arrangements of oil-gas burners in thermal power plant boilers / Taymarov M.A., Akhmetova R.V., Akhmetov E.A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol.552. 012008.

[12] Зацаринная Ю.Н. Мероприятия по снижению экологического риска при эксплуатации котельных / Ю.Н. Зацаринная, А.Р. Хайбуллина, Г.Р. Шабиева, И.Р. и др. // Вестник Казанского технологического университета. — Казань. 2016. Т.19, № 10, С.133-134.

[13] T. Vaskovskay. Contribution of transmission and voltage constraints to the formation of locational marginal prices / T. Vaskovskay, P.G. Thakurta, J. Bialek // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 101. P. 491-499.

[14] A.V. Dmitriev. Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower / A.V. Dmitriev, I. N. Madyshev, V.V. Kharkov, V.E. Zinurov // Thermal Science and Engineering Progress. 2021. Vol. 22. 100835.

Казаков Ю. Б.<sup>1</sup>, Нестеров С. А.<sup>1</sup>, Страдомский Ю. И.<sup>1</sup>, Шумилов Е. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет», филиал в гор.

Сызрань

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Аннотация:* Оценена применимость магнитожидкостной герметизации валов электродвигателей при повышении частоты вращения. Выполнено взаимосвязанное моделирование магнитного и гидродинамического полей герметизатора. Определены свойства и характеристики герметизаторов. Описана адаптивная электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов электродвигателей. Предложена усовершенствованная конструкция и алгоритм управления магнитожидкостными герметизаторами.

*Ключевые слова:* регулируемые электродвигатели, уплотнение вала, магнитожидкостный герметизатор, конструкция, магнитное поле, численное моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

При работе электродвигателей (ЭД) при повышенной влажности, запыленности, необходимости изолирования химически активных газов, снижения коррозии, предотвращения вытекания масла, загрязнения частей ЭД и окружающей среды актуальна надежная герметизация (уплотнение) выходного вращающегося вала ЭД. Перспективно

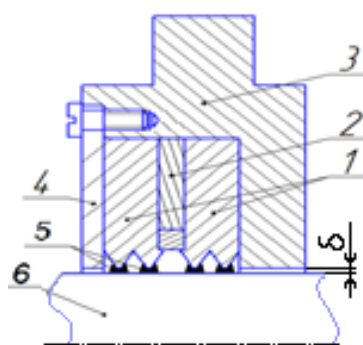


Рис. 1. Феррожидкостный герметизатор вала электродвигателя:

1 – полюсы; 2 – магнит; 3 – немагнитный корпус; 4 – фланец; 5 – феррожидкость; 6 – вал

применение магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) [1, 2] (рис. 1). Магнитная жидкость (МЖ) помещается в зазор  $\delta = (0,15-0,4)$  мм между вращающимся валом и неподвижными полюсами, смачивает их и удерживается магнитным полем. МЖГ могут устанавливаться в выносных подшипниковых узлах или даже крышках подшипников ЭД. МЖГ начинают применяться в ЭД, работающих в ответственных и тяжелых условиях, например, во взрывозащищенных ЭД типов ВАСО, ВАСВ, АСВО, ВАСВ [3].

МЖГ обеспечивают более эффективную герметизацию валов по сравнению с уплотнениями с механическим контактом (манжетными, сальниковыми, лабиринтными и др.) так как имеют повышенную герметичность и долговечность, в них отсутствует износ вала, вследствие жидкостного трения собственные потери малы, они выдерживают высокий перепад давлений, у них мала скорость утечки МЖ, отсутствует необходимость в смазке. МЖГ могут работать при знакопеременных давлениях и вибрационных воздействиях, способны выталкивать из себя немагнитные частицы пыли и влагу, самовосстанавливаться после пробоя. Устойчивость удержания МЖ в зазоре МЖГ определяется соотношением гравитационной и магнитной энергий в МЖ. В реальных МЖГ, магнитные силы в среднем на три порядка превосходят силу тяжести [1]. Применяемые в настоящее время МЖГ рассчитаны на работу в установившихся режимах. Работа МЖГ в неноминальных и нестационарных режимах (при изменении частоты вращения вала, останове, в повторно-кратковременных режимах, с изменяемым перепадом давления, в неноминальных температурных условиях) имеет ряд особенностей. Расширение использования частотных электроприводов, регулируемых ЭД вызывает необходимость анализа работы МЖГ с изменением частоты вращения. Применение в высокоскоростных ЭД традиционных конструкций МЖГ сдерживается действием центробежных сил, стремящихся отбросить МЖ из зазора. Ослабляется контакт МЖ с валом, уменьшается удерживаемый перепад давления. Рекомендовано ограничение линейной скорости движения МЖ  $v_{\text{МЖ}} < 10$  м/с [1,2,4,5] на поверхности вала.

Целесообразно оценить применимость МЖГ в регулируемых высокоскоростных ЭД.

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

Для ЭД с частотой вращения  $n = 3000$  об/мин рекомендация  $v_{\text{МЖ}} < 10$  м/с дает максимально допустимый диаметр вала

$$D_{\text{max}} \leq 60 \cdot v_{\text{МЖ}} / (\pi n) = 63,7 \text{ мм}, \quad (1)$$

что ограничивает мощность ЭД при заданной частоте вращения.

Предварительно аналитически оценить удерживаемый перепад давления МЖГ с МЖ, находящейся в состоянии магнитного насыщения, можно как

$$\Delta p = M_S (B_{\text{max}} - B_{\text{min}}) - 2\rho_{\text{МЖ}} v_{\text{МЖ}}^2 \delta / D, \quad (2)$$

где  $M_S$  – намагниченность насыщения МЖ;  $B_{\text{max}}$  – максимальная магнитная индукция в МЖ;  $B_{\text{min}}$  – минимальная индукция в МЖ;  $\rho_{\text{МЖ}}$  – плотность МЖ. Первый член (2) определяет вклад магнитных сил, второй – центробежных сил.

Для корректной оценки возможности применения МЖГ в высокоскоростных ЭД выполнено мультифизическое численное моделирование магнитного и гидродинамического состояний МЖГ при изменении частоты вращения вала [6], определение критической  $v_{\text{МЖ}}$ . Исследование выполнено в пакете численного моделирования Comsol Multiphysics в области одного зубца МЖГ. Задача формулировалась в двухмерной стационарной осесимметричной постановке (рис. 2).

Анализ магнитного состояния МЖГ проводился на основе численного решения дифференциальных уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \text{rot} \bar{H} &= \bar{J}; \text{div} \bar{B} = 0; \text{rot} \bar{E} = \frac{d\bar{B}}{dt}, \\ \bar{J} &= \gamma(\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B}); \bar{B} = \mu(H) \bar{H}; B = \text{rot} \bar{A} \end{aligned} \quad (3)$$

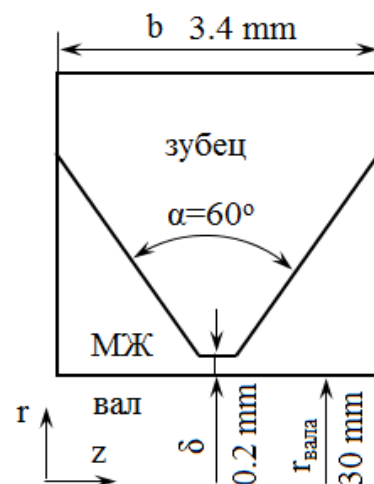


Рис. 2. Расчетная область зубца МЖГ

где  $B$ ,  $H$ ,  $E$ ,  $J$  – векторы индукции, напряженностей магнитного и электрического полей, плотности тока;  $\gamma$  – электропроводность;  $\mu$  – магнитная проницаемость;

$A$  – векторный магнитный потенциал.

На МЖ, действуют сила тяжести и магнитная сила.

$$\bar{F} = \rho_{\text{мж}} \bar{g} + \mu_0 M \nabla \bar{H} \quad (4)$$

Стационарное ламинарное течение несжимаемой ньютоновской МЖ в зазоре МЖГ описывается уравнением Навье-Стокса

$$\rho \left[ (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right] = -\nabla p + \nabla \left( \eta \left( \nabla \bar{v} + (\nabla \bar{v})^T \right) \right) + \bar{F}. \quad (5)$$

Здесь:  $p$  – давление;  $\eta \neq \text{const}$  – динамическая вязкость МЖ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $M$  – намагниченность МЖ;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\nabla H$  – градиент напряженности магнитного поля.

Принято, что зазор полностью заполнен МЖ, вязкость МЖ постоянна  $\eta = 1.33 \text{ Па}\cdot\text{с}$  и не зависит от  $B$ , скорости сдвига и температуры;  $\rho_{\text{мж}} = 1245 \text{ кг/м}^3$ . Магнитные свойства стального зубца заданы характеристикой намагничивания, намагниченность МЖ принята равной  $M_s = 38300 \text{ А/м}$ .

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. (3) представлены результаты расчета магнитного поля. Из анализа результатов (рис. 3,б) следует, что разница между  $B_{\text{max}}$  и  $B_{\text{min}}$  составляет 0,865 Тл, что использовано при расчете соотношения (2).

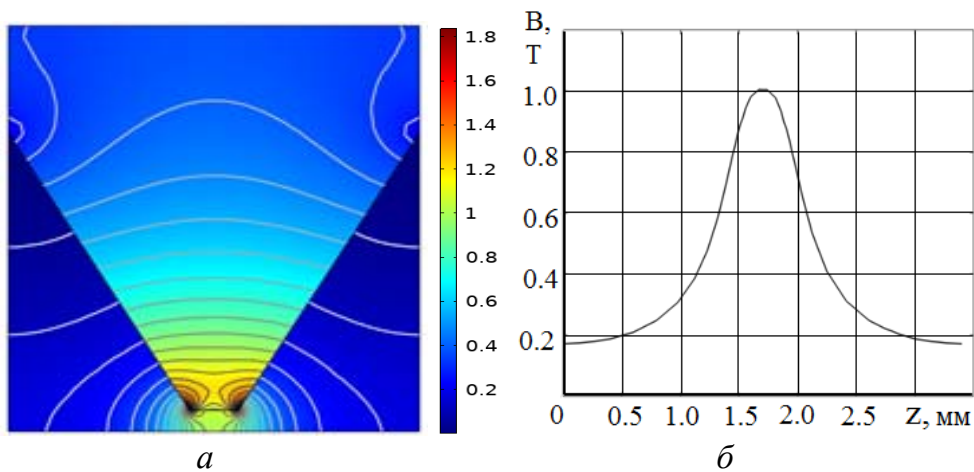


Рис. 3. Магнитное поле в рабочем зазоре МЖГ:  
*а* – распределение магнитного поля и линии равной индукции;  
*б* – распределение магнитной индукции по поверхности вала

На рис. 4 представлены результаты численного расчёта поля распределения давлений при неподвижном вале ( $n = 0, v_{\text{вала}} = 0, v_{\text{МЖ}} = 0$ ).

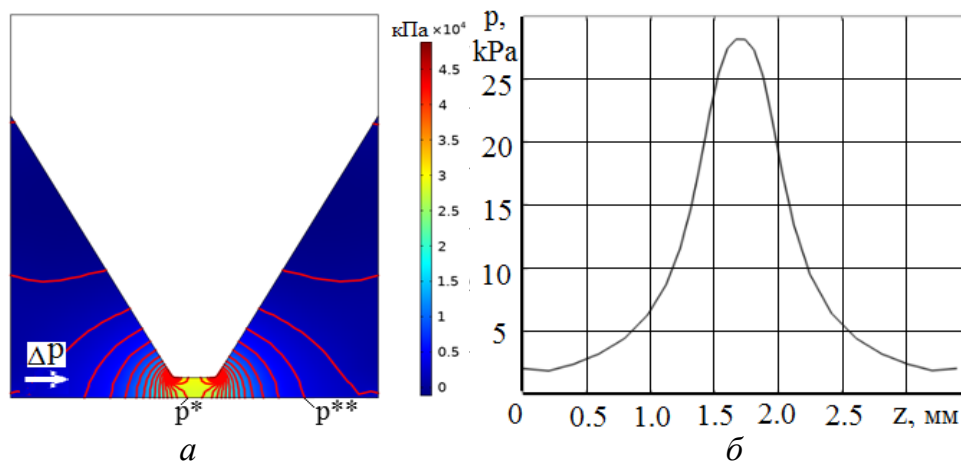


Рис. 4. Распределение давления в МЖ при неподвижном вале:  
*а* – распределение давления и линии равного давления;  
*б* – распределение давления по поверхности вала

Перепад давлений можно определить как

$$\Delta p = p^* - p^{**}, \quad (6)$$

где точки  $p^*$  и  $p^{**}$  – максимальное и минимальное давления на валу (рис. 4,а).

Для рассматриваемого случая  $\Delta p_5 = 28.2 - 1.8 = 26.4$  кПа ,

На рис. 5 показаны распределения линий давлений в МЖ при разных  $v_{\text{вала}}$ .

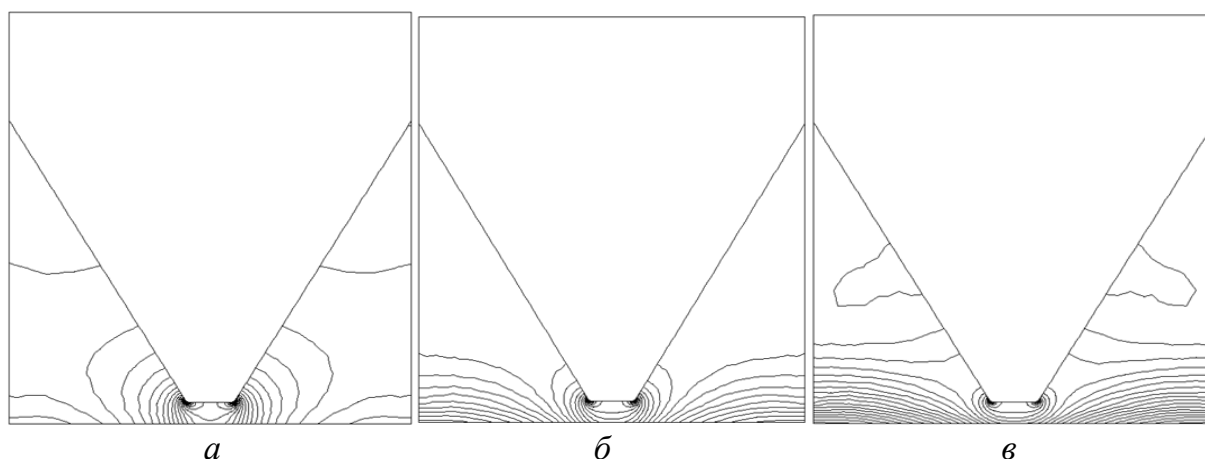


Рис. 5. Линии равного давления в магнитной жидкости:  
 $a - v_{\text{вала}} = 20 \text{ м/с}$ ,  $б - v_{\text{вала}} = 40 \text{ м/с}$ ,  $в - v_{\text{вала}} = 60 \text{ м/с}$

При увеличении  $v_{\text{вала}}$  возрастают центробежные силы, уменьшается число линий равных давлений, связывающих зубец с валом, уменьшается  $\Delta p$ . Так на рис. 5,в нет линий равного давления, связывающих зубец с валом, и  $\Delta p=0$ .

На рис. 6 представлено изменение  $\Delta p$  при изменении  $v_{\text{вала}}$  на валу. Из анализа результатов следует, что при  $v_{\text{вала}} < 10 \text{ м/с}$  изменение  $\Delta p$ , связанное с центробежным эффектом, не превышает 2 % от значений  $\Delta p$  при  $v_{\text{вала}} = 0$ . Значительное влияние центробежные силы начинают оказывать при  $v_{\text{вала}} = (20-25) \text{ м/с}$ , при  $v_{\text{вала}} \approx 30 \text{ м/с}$  снижение  $\Delta p$  достигает 2 раз. При  $v_{\text{вала}} > 50 \text{ м/с}$  возникает отрыв МЖ от поверхности вала, МЖГ теряет герметичность. Перепад давления при неподвижном вале ( $v_{\text{МЖ}} = 0$ ) по соотношению (2) составляет  $\Delta p_{2 \text{ } v=0} = 31,41 \text{ кПа}$ , что на 16 % больше рассчитанного  $\Delta p_5$ . С увеличением  $v_{\text{вала}}$  расхождения между значениями  $\Delta p$  по соотношению (2) и на основе численного расчета поля давлений возрастает и при  $v_{\text{вала}} \approx 40 \text{ м/с}$  разница достигает 47 %.

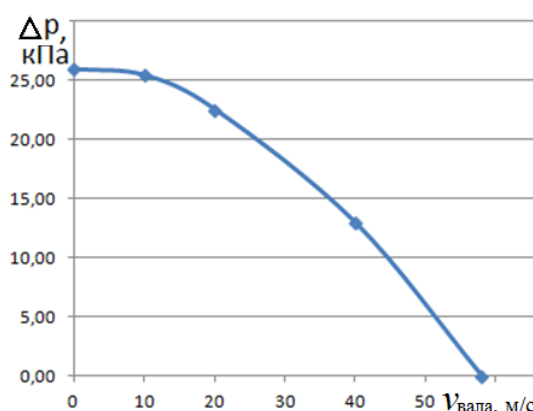


Рис.6. Удерживаемый перепад давления при изменении линейной скорости вала

Изменение свойств МЖГ может достигаться изменением магнитного потока  $\Phi$ . Так, например, чем больше требуется  $\Delta p$ , тем больший должен быть



$\Phi$ . В то же время при останове ( $n = 0$ ,  $v_{\text{мж}} = 0$ ) и значительном  $\Phi$  в находящейся в покое МЖ начинается процесс фильтрации жидкости-носителя в область  $V_{\text{min}}$  и концентрации ферромагнитной фазы в области  $V_{\text{max}}$ . Перераспределение магнитных частиц в МЖ увеличивается со временем покоя и  $\nabla H$ . Возможно расслоение МЖ и потеря работоспособности МЖГ. Поэтому при отсутствии вращения вала и/или перепада давлений, например, при длительном останове или хранении ЭД, целесообразно снижение  $\Phi$  так, чтобы только обеспечить удержание МЖ в зазоре. Это позволит увеличить ресурс работы МЖГ. При увеличении частоты вращения вала, с целью компенсации центробежных сил, целесообразно увеличивать  $\Phi$ . Но при чрезмерном  $\Phi$  и, соответственно, ферромагнитной силе может разрушаться оболочка поверхностно-активного вещества, покрывающего магнетитовые частицы в МЖ, происходить их агрегатирование, выпадение в осадок и нарушение работоспособности МЖГ. Возрастание  $\Phi$  увеличивает вязкость МЖ и момент трения МЖГ, повышает потери на жидкостное трение. Возрастание  $v_{\text{мж}}$  квадратично увеличивает вязкостные потери. С ростом температуры вязкость МЖ нелинейно снижается [7]. При температуре МЖ (130-150) °С возможно ее вскипание и потеря герметизирующих свойств.

Для расширения применимости МЖГ в регулируемых ЭД целесообразно использовать адаптивную систему управления свойствами МЖГ с изменением  $\Phi$  при изменении режима работы ЭД, содержащую усовершенствованную конструкцию МЖГ [8] и программу управления свойствами МЖГ [9]. Регулируемый МЖГ содержит небольшой магнит, способный только удерживать МЖ в условиях покоя, и две обмотки со своими магнитопроводами, соединенные с датчиками перепада давления и частоты вращения и создающие свои  $\Phi$ . Программа управления МЖГ по сигналам с датчиков изменяет результирующий  $\Phi$  путем регулирования токов в обмотках.

Для высокоскоростных ЭД эффективны МЖГ с зубцами на валу [1, 2]. В такой конструкции градиент магнитного поля направлен из зазора к зубцам вала и противоположен центробежной силе, действующей на МЖ. По

результатам расчетов определено, что при возрастании частоты вращения ЭД, вследствие подтягивания МЖ центробежными силами к вершинам зубцов вала, возможно до 2 раз повышение  $\Delta p$ , по сравнению с  $\Delta p$  при неподвижном валу [6] (рис. 7). При дальнейшем повышении частоты вращения вала  $\Delta p$  начинает снижаться.

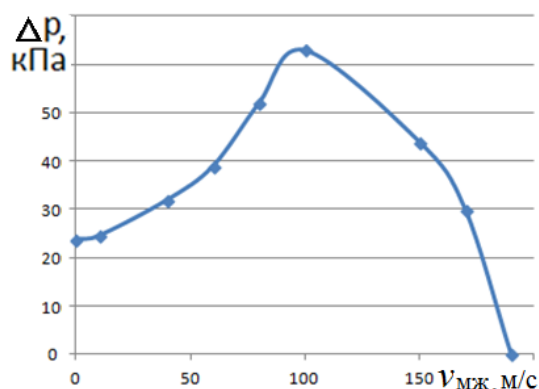


Рис. 7. Удерживаемый перепад давления МЖГ с зубцами на валу при изменении  $v_{МЖ}$

Отрыв МЖ от вала происходит при значительно большей  $v_{МЖ}$ , чем для конструкции, представленной на рис. 1.

Наилучшие результаты по достижению повышенного удерживаемого перепада давления при увеличении  $v_{МЖ}$  обеспечивают МЖГ с размещением источников магнитного поля и зубцов на валу с вращением полюсов. Но это связано с усложнением конструкции МЖГ при размещении магнитов или обмоток на валу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение традиционных конструкций МЖГ в регулируемых электродвигателях возможно с возрастанием линейной скорости движения магнитной жидкости до 50 м/с при снижении удерживаемого перепада давления.

Удерживаемый перепад давления, определяемый по упрощенным аналитическим соотношениям, дает завышенные значения от 16 % при малых до 50 % при больших скоростях движения магнитной жидкости.

Повышение эффективности МЖГ валов регулируемых ЭД возможно путем применения адаптивной электротехнической системы электромагнитного управления магнитным потоком в МЖГ по сигналам с датчиков частоты вращения, перепада давления, температуры.

Применение конструкций МЖГ с зубцами на валу позволяет их использовать в высокоскоростных регулируемых электродвигателях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
- [2] Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков и др. – Иваново, ИГЭУ, 2010. – 184 с.
- [3] Радионов А.В., Виноградов А.Н., Казакуца А.В. Магнитожидкостные герметизаторы подшипниковых узлов электродвигателей ВАО // Сб. тр.: 16 Междун. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Иваново: ООО «Прес-Сто», 2014. - С. 335-339.
- [4] M.S. Krakov, I.V. Nikiforov. Influence of the shaft rotation on the stability of magnetic fluid shaft seal characteristics // Magneto hydrodynamics, 2008, vol. 44 (4), pp. 401-408.
- [5] Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. The Specific Features of High-Velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes // Open Eng, 2018, vol. 8, pp. 539-544. doi: 10.1515/eng-2018-0066.
- [6] S.A. Nesterov, Yu. I. Stradomskii, V. S. Belov. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Sealer // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE - 2021.- Vol. 3 (51). - P. 1-9. DOI:10.52254/1857-0070.2021.3-51.01
- [7] Власов А.М., Казаков Ю.Б., Полетаев В.А. Влияние конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели магнитожидкостных герметизаторов валов электродвигателей // Вестник ИГЭУ. 2019. №5. С.40-47.
- [8] Патент на изобретение RU №2721400 С1. Магнитожидкостное уплотнение вала электродвигателя / Власов А.А., Казаков Ю.Б., Полетаев В.А. // Оpubл. в Б.И. №14 от 19.05.2020.
- [9] Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020667630. Программа управления магнитожидкостной герметизацией валов частотно-регулируемых электродвигателей с изменяемым удерживаемым перепадом давления / А.М. Власов, Ю.Б. Казаков, С.А. Нестеров // Зарег. 25.12.2020 г.

*Ашмарин В. В., Филиппов З. С., Филиппова О. А.*

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ШУНТИРУЮЩЕГО РЕЖИМА ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ УСКОРИТЕЛЯМИ МАСС**

*Аннотация:* В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке эффективности шунтирующего режима применительно к электродинамическим ускорителям масс, которые позволяют обоснованно определять параметры шунтирующих разрядников, и обеспечивают эффективность режима шунтирования малоиндуктивной нагрузки.

*Ключевые слова:* режим шунтирования, разрядный контур, ускорители массы, коммутатор, интеграл действия, оптимизация параметров.

Для исследования процессов, связанных с силовым воздействием сильных импульсных магнитных полей мегагауссового диапазона на проводящие материалы, широкое применение нашли экспериментальные стенды с электродинамическими ускорителями масс, в которых в качестве

источника энергии используют мощные емкостные накопители энергии (ЕНЭ) многомодульного использования с запасаемой энергией сотни килоджоулей. Результаты моделирования на таких стендах процессов высокоскоростных соударений в широком диапазоне изменения масс и скоростей взаимодействующих тел позволяют разработать методику проектирования [1] средств микрометеорной защиты элементов конструкций летательных аппаратов. Для этой цели применяют электродинамические ускорители масс с отдельным регулированием тока в метаемом теле и тока в соленоиде, в рабочей зоне которого создается ускоряющее магнитное поле. Плотность тока в метаемом проводнике выбирается из условия получения предельно допустимых по условиям нагрева скоростей метания таким образом, чтобы в момент соударения с преградой проводник был в твердом состоянии. На получение максимально достижимых индукций внешнего ускоряющего магнитного поля накладываются ограничения, связанные с прочностными характеристиками материала соленоида. Существенное замедление скорости нарастания поля с индукцией более 50 Тл связано с резко нелинейной диффузией магнитного поля в металл и разрушением токнесущего скин-слоя окна соленоида, в зоне которого происходит процесс метания. Разрушение происходит вследствие выброса металла из нагретого импульсным током разряда ЕНЭ (сотни килоампер) скин-слоя возникающими пондеромоторными силами и сопровождается радиальным и осевым течением металла за счет его пластической деформации. При этом происходят увеличение начального размера окна соленоида, возрастание его индуктивности и снижение достижимых в эксперименте индукций ускоряющего магнитного поля и скорости метания. Существенное увеличение первоначальных размеров окна за счет взрыва скин-слоя наблюдается лишь после первого максимума тока разряда ЕНЭ ( $t > T/4$ , где  $T$  – период разрядного тока) и происходит со скоростью более 500 м/с при  $B_m = 75$  Тл. Так как пластическая деформация металлов развивается сравнительно медленно, электрический взрыв токнесущей поверхности окна соленоида является основным препятствием

при получении быстро нарастающих полей и больших значений скорости метания.

Одним из способов снятия этого ограничения является использование униполярной формы импульса разряда. Это может быть достигнуто включением в момент максимума тока разряда ЕНЭ малоиндуктивного устройства, шунтирующего нагрузку. При этом форма напряжения на конденсаторах ЕНЭ близка к периодической, что значительно повышает ресурс работы конденсаторов накопителя энергии и позволяет более эффективно использовать запасенную в конденсаторах энергию.

К шунтирующим разрядникам предъявляются более жесткие требования по сравнению со стартовыми разрядниками как по собственной индуктивности и рабочему току, так и по управлению их синхронным срабатыванием в условиях, когда напряжение на главных электродах близко к нулю. Для создания шунтирующего режима разрядной цепи ЕНЭ наибольшее применение нашли разрядники тригatronного типа, отличающиеся сравнительной простотой конструкции приемлемыми для лабораторных исследований параметрами. Однако подобные разрядники обладают ограниченной зоной рабочих напряжений, в которой наблюдается их устойчивая работа [2].

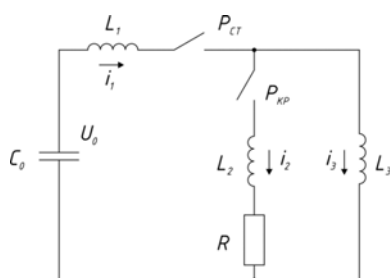
При рабочих напряжениях, близких к статическим пробивным, велика вероятность их самопроизвольного срабатывания. В [3] сделана попытка расширения диапазона рабочих напряжений путем регулирования расстояния между основными электродами разрядника, однако это привело к существенному увеличению времени запаздывания срабатывания тригatronа и получению достаточно крутой временной характеристики.

В [4] приводится способ обеспечения минимальной индуктивности разрядника путем увеличения размеров электродов и применения бифилярного токоподвода при многоканальном исполнении в конструкции твердотельного разрядника с поверхностным скользящим разрядом. Однако возникают повышенные требования к скорости нарастания поджигающего импульса, необходима частая замена изолятора вследствие его значительного износа и

металлизации поверхности продуктами разряда после небольшого числа включений.

Проведенный обзор публикаций по шунтирующим разрядникам показал, что отсутствуют описания конструкций шунтирующих разрядников, позволяющих организовать стабильный многоканальный искровой разряд с малой индуктивностью и активным сопротивлением цепи разряда. Особенно это важно в случае, когда величина токов коммутации составляет сотни килоампер и встает вопрос о повышении эрозионной стойкости электродов разрядника [5], влияющей на стабильность срабатывания с минимальным разбросом временных характеристик.

Реализация шунтирующего режима ЕНЭ на практике затруднена ввиду отсутствия аналитического выражения для определения основных параметров шунтирующего разрядника, влияющих на форму кривой тока в нагрузке. Кроме того, нет инженерно-обоснованных технических решений, позволяющих обеспечить шунтирование нагрузки в виде электродинамических устройств с малой индуктивностью ( $L_3 = 50\text{--}700$  нГн) при рабочем напряжении ЕНЭ, близком к нулю. На рис. 1 приведена схема замещения емкостных накопителей энергии с шунтирующим разрядником.



*Рис. 1. Схема замещения емкостных накопителей энергии с шунтирующим разрядником*

*Здесь:  $C_0$  – емкость накопителя;  $L_1$  – индуктивность кабельной ошиновки и стартового разрядника;  $L_2$  – индуктивность шунтирующего разрядника;  $R$  – активное сопротивление шунтирующего разрядника;  $L_3$  – индуктивность кабельной ошиновки токосборного коллекторного узла и нагрузки*

По данным, представленным на рис. 1, рассмотрим процесс коммутации, который происходит следующим образом. После срабатывания стартового

разрядника  $R_{ст}$  накопитель энергии начинает разряжаться на нагрузку. Напряжение на емкости  $C_0$  изменяется по косинусоидальному закону. В момент максимума тока, когда напряжение на емкостях накопителя близко к нулю, происходит срабатывание шунтирующего разрядника  $R_{кр}$ , и ток в нагрузке будет экспоненциально затухать с постоянной времени, определяемой параметрами R–L–C цепи.

Используя метод контурных токов, запишем уравнение 1, которое позволит провести численный анализ переходных процессов в приведенной схеме замещения при шунтировании нагрузки в момент времени  $t_{кр} = T/4$ .

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + R(i_3 + i_1) + L_2 \frac{d(i_3 - i_1)}{dt} = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt; \\ L_3 \frac{di_3}{dt} + R(i_3 - i_1) + L_2 \frac{d(i_3 - i_1)}{dt} = 0; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{i_1}{C}; \quad \frac{d\theta}{dt} = i_3^2, \end{cases} \quad (1)$$

где:  $i_1(t)$  и  $i_3(t)$  – токи в контурах;

$\varphi(t) = U_0(0) - \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt$  – напряжение на емкости  $C_0$ ;

$\theta(t) = \int_0^t i_3^2 dt$  – интеграл действия тока.

Для решения системы 1 приведем ее в безразмерный вид, вводя базисные величины:

$$U_6 = U_0; \quad C_6 = C_0; \quad L_6 = L_3; \quad R_6 = \sqrt{\frac{L_6}{C_6}} = \sqrt{\frac{L_3}{C_3}}$$

$$I_6 = U_6 \sqrt{\frac{C_6}{U_6}} = U_0 \sqrt{\frac{C_0}{L_3}}; \quad t_6 = \sqrt{L_6 C_6} = \sqrt{L_3 C_0}$$

Используя метод Кутта-Мерсона для широкого диапазона изменяющихся параметров, запишем систему приведенных уравнений 2, которые имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{d\tau} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} [(1 + \lambda_3)\varphi + (I_3 - I_1)\rho]; \\ \frac{dI_2}{d\tau} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} [\lambda_2\varphi + (I_3 - I_1)\rho\lambda_0]; \\ \frac{d\varphi}{d\tau} = -I_1; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = I_2^2, \end{cases} \quad (2)$$

где:  $I = \frac{i}{I_0}$ ;  $\lambda_0 = \frac{L_1}{L_0}$ ;  $\rho = \frac{R}{R_0}$ ;  $\lambda_2 = \frac{L_2}{L_0}$ ;  $\tau = \frac{t}{T_0}$ ;  $\varphi = \frac{U_0}{U_0}$

Начальные условия для момента  $\tau = \tau_0 = 0$  можно записать следующим образом:

$$I_1(0) = I_2(0) = I_0 = \frac{1}{1 + \lambda_0} = 0,9; \quad \varphi(0) = \varphi_0.$$

Система приведенных уравнений 2 решалась при следующих исходных данных:  $C_0 = 108$  мкФ,  $U_0 = 20$  кВ,  $L_1 = 137$  нГн,  $L_3 = (50-750)$  нГн,  $T/4 = 13$  мкс.

Зависимости тока в нагрузке от времени при различных параметрах шунтирующего разрядника, полученные в результате проведенного численного моделирования, приведены на рис. 2.

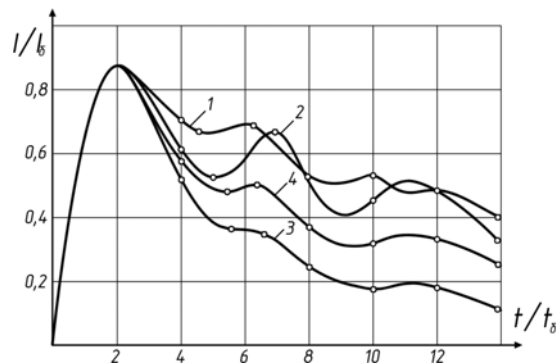


Рис. 2. Зависимость тока нагрузки от времени в шунтирующем режиме при 1 -  $L_3 = 511$  нГн,  $L_2 = 20$  нГн,  $R = 5$  мОм, 2 -  $L_2 = 20$  нГн,  $R = 10$  мОм, 3 -  $L_2 = 20$  нГн,  $R = 15$  мОм, 4 -  $L_2 = 40$  нГн,  $R = 5$  мОм

Для оценки эффективности применения шунтирующего режима ЕНЭ принималось условие [6], что интеграл действия тока  $Q_{кр}$  за первый период  $T$  его изменения должен быть больше или равен половине суммы интегралов действия тока для синусоидальной формы кривой:

$$Q_{син} = \frac{1}{\omega} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) = 0,5 I_m^2 t \quad (3)$$



Для идеального шунтирования это условие можно записать в следующем виде:

$$Q_{ид} = \frac{1}{\omega} \int_0^{T/4} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) = 0,5 I_m^2 t + \int_{T/4}^T I_m^2 dt = 0,75 I_m^2. \quad (4)$$

Также это условие можно записать в следующем виде:

$$Q_{кр} \geq Q_{крит} = \frac{Q_{шунт} + Q_{ид}}{2} = 0,6875 I_m^2. \quad (5)$$

Таким образом, экспертная оценка степени влияния активного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L_2$  шунтирующего разрядника на интеграл действия  $Q_{кр}$  показала, что его значение уменьшается с увеличением активного сопротивления и индуктивности цепи шунтирования, причем основной вклад вносит изменение активного сопротивления. С целью определения значений  $Q_{кр}$  в зависимости от величин  $R$  и  $L_2$  при варьировании индуктивности нагрузки  $L_3$  в диапазоне, характерном для электродинамических ускорителей, были приведены экспериментальные исследования на разработанной конструкции четырехканального разрядника с искажением поля и двумя управляющими электродами на канал, описанной в [7, 8]. Принципиальная электрическая схема электрофизической установки с накопителем энергии многомодульного исполнения с шунтирующими разрядниками приведена на рис. 3.

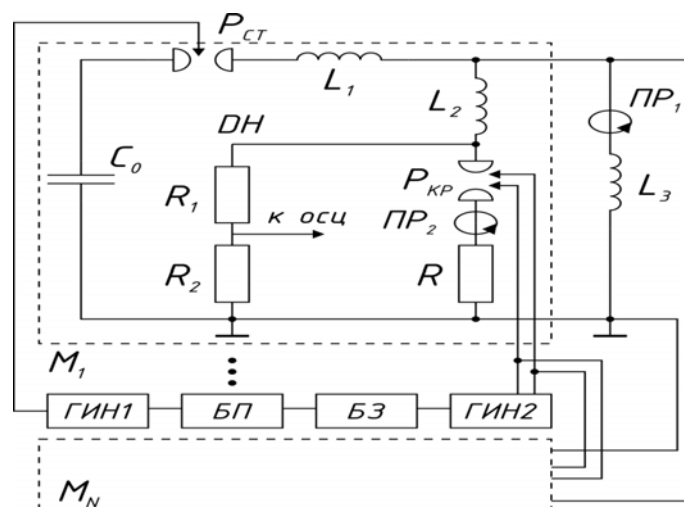


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема емкостного накопителя энергии с шунтирующими разрядниками.

Здесь:  $C_0 = 108$  мк,  $\Phi$  - емкость модуля емкостного накопителя;  $R_{ст}$  – стартовый разрядник;  $L_1 = 137$  нГн – индуктивность кабельной ошиновки и стартового разрядника;  $R_{кр}$  – шунтирующий разрядник;  $L_2$  – индуктивность шунтирующего разрядника;  $R$  – активное сопротивление шунтирующего разрядника;  $L_3$  – индуктивность нагрузки; ГИН1, ГИН2 – генераторы импульсных напряжений;  $M_1...M_N$  – модули емкостного накопителя энергии; БП – блок поджига; БЗ – блок задержки.

В эксперименте использовался один модуль установки с запасаемой энергией  $W_1 = 45$  кДж (15 конденсаторов марки ИК-25/12,  $U_{раб} = 20$  кВ). После срабатывания стартового разрядника  $P_{ст}$  модуль ЕНЭ разряжается в колебательном режиме на нагрузку с индуктивностью  $L_3$ .

Управление срабатыванием  $P_{ст}$  осуществлялось от трехступенчатого генератора импульсов напряжения ГИН-1 с параметрами импульса –  $U_{m1} = 100$  кВ,  $\tau_{фр1} = 80$  нс.

В момент максимума тока ( $t_{кр} = T/4$ ) на управляющие электроды шунтирующего разрядника  $P_{кр}$  подавался импульс напряжения от генератора импульсов ГИН-2 с параметрами  $U_{m2} = 100$  кВ,  $\tau_{фр2} = 10$  нс.

Требуемая задержка времени срабатывания ГИН-2 обеспечивалась блоком задержки БЗ. Управляющие высоковольтные импульсы на срабатывание блоков ГИН-1, ГИН-2, БЗ формировались блоком поджига БП и подавались на них по системе коаксиальных кабелей. Значение индуктивности нагрузки  $L_3$  варьировалось в диапазоне от 100 до 750 нГн, характерном для электродинамических ускорителей масс.

С целью выяснения влияния индуктивности  $L_2$  шунтирующего разрядника на интеграл действия тока  $Q_{кр}$  последовательно с ним включалась металлическая петля с изменяющейся площадью витка. Величина индуктивности  $L_2$  определялась по периоду разрядного тока  $i_2(t)$  в цепи шунтирования. Влияние активного сопротивления  $R$  шунтирующего разрядника на значение  $Q_{кр}$  учитывалось путем изменения числа параллельных каналов разряда в коммутаторе. При этом сопротивление  $R$  определялось путем деления

активной составляющей падения напряжения на дуговом канале на величину тока, протекающего в цепи шунтирования. Напряжение на дуге измерялось омическим делителем напряжения с коэффициентом деления  $K_{\text{дел}} = 28$ , а амплитудные значения токов  $i_2(t)$  и  $i_3(t)$  и их форма контролировались измерительными поясами Роговского РП<sub>1</sub> и РП<sub>2</sub>. Характерная осциллограмма токов в нагрузке и в шунтирующей цепи приведена на рис. 4.

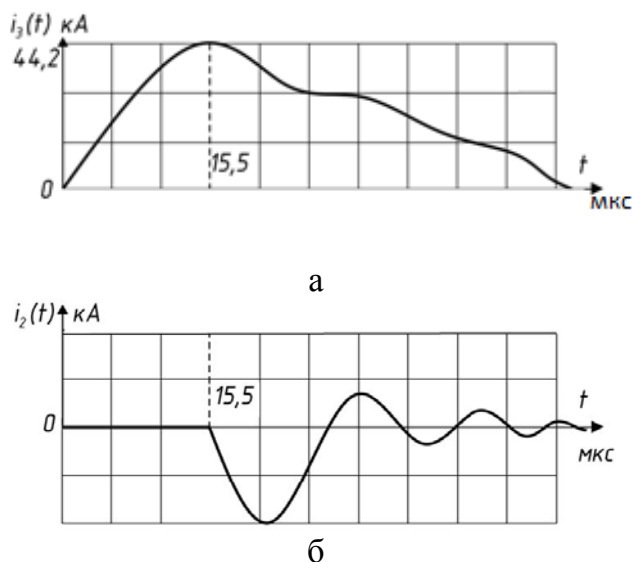


Рис. 4. Осциллограмма тока через нагрузку (а) и шунтирующий разрядник (б):  
 $L_3 = 680 \text{ нГн}$ ,  $I_m = 44 \text{ кА}$ ;  $T = 62 \text{ мкс}$ ;  $L_2 = 35 \text{ нГн}$ ;  $R = 3,7 \text{ МОм}$ .

Для оценки эффективности процесса метания в электродинамических устройствах при обеспечении шунтирующего режима принималось условие (6).

$$Q_{\text{кр}} = \int_0^T I_m^2 dt \quad (6)$$

Интеграл действия тока определялся по осциллограмме, исходя из максимального значения тока в нагрузке. Если это значение оказывалось больше или равным критическому значению интеграла тока  $Q_{\text{кр}}$ , определенному по выражению (6), то считалось что требуемое качество шунтирования обеспечено.

Данные проведенных экспериментальных исследований по оценке эффективности шунтирующего режима применительно к электродинамическим ускорителям масс в виде зависимостей  $Q_{\text{кр}} = f(L_2)$  и  $Q_{\text{кр}} = f(R)$  приведены на рис. 5 и 6.

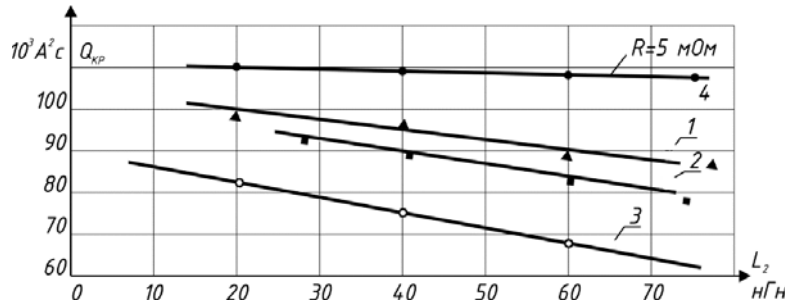


Рис. 5. Зависимости интеграла действия тока  $Q_{кр}$  от индуктивности  $L_2$ :  
 1 -  $L_3=444$ нГн;  $R=2,7$ МОм;  $I_m=51,5$ кА;  $T=23$ мкс;  $Q_{крит} = 96883 A^2 c$ ; 2 -  $L_3 = 508$  нГн;  
 $R= 2,9$  МОм;  $I_m= 49,2$  кА;  $T= 55,5$  мкс;  $Q_{крит} = 92537 A^2 c$ ; 3 -  $L_3=680$ нГн; $R=3,7$ МОм;  
 $I_m=44,2$ кА;  $T=62$ мкс;  $Q_{крит}=79600 A^2 c$ ; 4 – результат численного моделирования при  
 $L_3=280$ нГн,  $L_2=20$ нГн

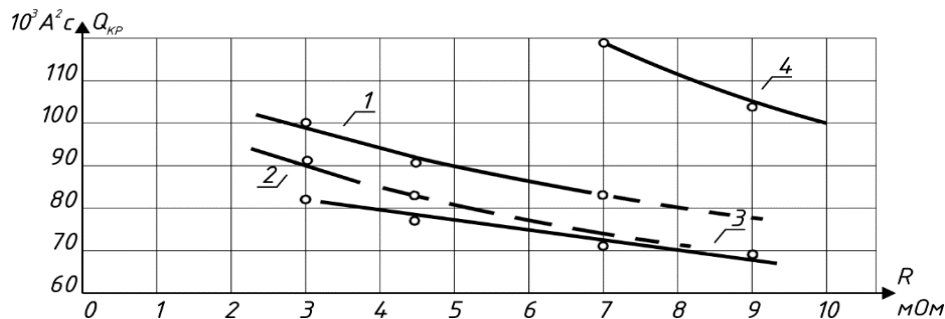


Рис. 6. Зависимости интеграла действия тока  $Q_{кр}$  от активного сопротивления  $R$ :  
 1 -  $L_3 = 444$  нГн;  $L_2 = 20$  нГн;  $I_m= 51,5$  кА;  $T= 53$  мкс;  $Q_{крит} = 96883 A^2 c$ ; 2 -  $L_3 = 508$   
 нГн;  $L_2 = 30$  нГн;  $I_m= 49,2$  кА;  $T= 49,2$  мкс;  $Q_{крит} = 92537 A^2 c$ ; 3 -  $L_3=680$ нГн;  
 $L_2=35$ нГн;  $I_m=44,2$ кА;  $T=62$ мкс;  $Q_{крит}=79600 A^2 c$ ; 4 – результат численного  
 моделирования при  $L_3=280$ нГн,  $L_2=20$ нГн.

Анализ приведенных зависимостей позволяет отметить следующее:

- зависимость  $Q_{кр} = f(L_2)$  является монотонно убывающей, требуемый эффект от применения замыкающего разрядника при индуктивности нагрузки  $L_3 = 444$  нГн (кривая 1, рис. 6) достигается при значении  $L_2 = 20$  нГн, при этом интеграл действия составляет:

$$Q_{кр} = 98946 A^2 \cdot c > Q_{крит} = 96833 A^2 \cdot c. \quad (7)$$

При увеличении индуктивности  $L_2$  до значения 40 нГн  $Q_{кр} < Q_{крит}$ , условие (6) не выполняется, и требуемая эффективность метания не обеспечивается. Аналогичные выводы можно сделать и при других значениях индуктивности нагрузки: кривая 2 -  $L_3 = 508$  нГн, кривая 3 -  $L_3 = 680$  нГн.

- зависимость  $Q_{кр} = f(R)$  также является монотонно убывающей, и требуемая эффективность от применения шунтирующего режима ЕНЭ для

индуктивности  $L_3 = 444$  нГн (кривая 1, рис. 6) обеспечивается при значении сопротивления  $R = 2,7$  мОм и  $Q_{кр} > Q_{крит}$ . При дальнейшем увеличении сопротивления величина интеграла действия становится меньше критического значения (кривые 2 и 3, рис. 6). Во всех случаях уменьшение интеграла действий с ростом  $R$  связано с уменьшением постоянной времени затухания тока в нагрузке –  $\tau = L_3/R$ , что приводит к уменьшению площади под кривой тока.

На основании проведенного анализа, необходимо отметить, что использование шунтирующего режима ЕНЭ с целью повышения эффективности процесса метания твердых тел, целесообразно при следующих соотношениях величин основных параметров шунтирующего разрядника и нагрузки  $L_3$ :

$$L_2 \leq 0,05L_3; R \leq 0,05\omega L_3, \quad (8)$$

где:  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_2(C_1+C_2)}}$  – круговая частота основной цепи разряда ЕНЭ.

Из соотношения величины 8 следует, что уменьшение индуктивности нагрузки  $L_3$  влечет за собой ужесточение требований к основным параметрам замыкающего кроубар-разрядника.

При значениях  $L_3 \leq 100$  нГн, что характерно для электродинамических ускоряющих систем малых масс кондукционного типа, необходимы шунтирующие разрядники со следующими параметрами:  $L_2 \leq 5$  нГн,  $R \leq 1$  мОм. Это может быть достигнуто уменьшением длины канала разряда, увеличением его проводимости и поперечного сечения. Для этой цели разработана конструкция [9] многоканального шунтирующего разрядника с твердым диэлектриком. Разрядник позволяет организовать многоканальный искровой разряд с высокой проводимостью при напряжении на основных электродах разрядника, близком к нулю. В качестве диэлектрика используется многослойная полиэтиленовая изоляция общей толщиной  $\delta \approx 1$  мм. Между слоями изоляции размещаются два управляющих электрода, способствующие

резкому искажению поля в промежутке. При подаче на управляющие электроды твердотельного разрядника в момент максимума тока высоковольтного импульса от ГИН с параметрами  $U_{\text{имп}} = 80$  кВ, длительностью фронта

$\tau_{\text{фр}} = 10$  нс происходит синхронный пробой всех четырех каналов в полиэтиленовой изоляции. Плазменная струя из камеры поджига [10] заполняет места предварительного пробоя в полиэтиленовой изоляции, обеспечивая сопротивление канала пробоя  $R \leq 1$  мОм и малую индуктивность разрядника.

На основании проведенного анализа можно утверждать, что основные результаты теоретических и экспериментальных исследований [11, 12] по оценке эффективности шунтирующего режима емкостных накопителей энергии с электродинамическими ускорителями масс могут быть сформулированы следующим образом:

- предложены аналитические выражения для расчета шунтирующего режима и определения формы импульса тока в нагрузке, исходя из параметров кроубар-разрядника и нагрузки;

- результаты экспериментальных исследований показали, что индуктивность шунтирующей цепи влияет на провал тока после достижения его максимального значения за счет осцилляций, а активное сопротивление – на время затухания тока в нагрузке;

- экспериментально установлено оптимальное соотношение основных параметров кроубар-разрядника и нагрузки, обеспечивающее необходимую эффективность шунтирующего режима;

- разработана конструкция твердотельного шунтирующего разрядника с малым активным сопротивлением и индуктивностью, позволяющая организовать многоканальный искровой пробой при рабочем напряжении накопителя энергии, близком к нулю;

- показано, что применительно к электромагнитным ускорителям целесообразно использовать многоканальные малоиндуктивные плоские разрядники с искажением поля. Такие разрядники обеспечивают как

синхронное включение параллельных контуров электродинамического устройства, так и шунтирование малоиндуктивной нагрузки в момент максимума тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Filippova, O.A. The role of the state program «Economic Development and Innovation-driven Economy» in the development of small and medium enterprises / O.A. Filippova, Z.S. Filippov // Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020. Vol. 172. P. 725-730
2. Finist, G. New spark-gap technology with efficient line-follow current suppression for the protection of powerful LV distribution systems / G. Finist, M. Wetter, T. Meyer // Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP). Estoril, 2016. P. 1-7
3. Grabowski, C. Operation of rail-gap switches in a highcurrent, low-inductance crowbar switch / Grabowski C., Derman J.H., Domonkos M., // IEEE Pulsed Power Conference (PPC), Austin, TX, 2015. P. 1-6
4. Reddy, C.S. Experimental Investigations Into Pulse-Charged Spark Gap Recovery Times and Influencing Factors. / C.S. Reddy, A. Sharma, K.C. Mittal // IEEE Transactions on Plasma Science, 2016. Vol. 44. N. 3. P. 331-337
5. Ashmarin, V. Investigation of the erosion characteristics of the arrester with field distortion based on its life tests / V. Ashmarin, Z. Filippov, O. Filippova // Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020. P. 9278454
6. Григорьева, Н.В. Оценка эффективности изменений в организации для выработки мер по преодолению сопротивлений / Н.В. Григорьева, О.А. Филиппова // Менеджмент, реклама и PR: современное состояние и тенденции развития: сборник научных статей. Чебоксары: Изд-во Чуваш. педагог. ун-та, 2019. С. 94-101
7. Ашмарин В.В. Многоканальный искровой разрядник / В.В. Ашмарин, А.А. Блохинцев, С.А. Калихман // Авторское свидетельство SU 983852 A1, 23.12.1982. Заявка № 3299158 от 05.06.1981
8. Абрамов А.М. Многоканальный управляемый разрядник / А.М. Абрамов, В.В. Ашмарин, С.А. Калихман // Патент на изобретение RU 2011253 C1, 15.04.1994. Заявка № 4943717/07 от 02.04.1991
9. Ашмарин В.В. Аттестация компьютеризированных рабочих мест по электромагнитной безопасности / В.В. Ашмарин // Технические науки: сегодня и завтра: тезисы докладов юбилейной итоговой науч. конф. Чебоксары, 1997. С. 42-43
10. Ашмарин, В.В. Расчет вероятности возникновения взрыва в комплексе складов отдела материально-технического снабжения и комплектации / В.В. Ашмарин, А.А. Блохинцев, В.А. Ашмарина, З.С. Филиппов // Качество и инновации в XXI веке: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 55-62
11. Ашмарин В.В. Шунтирующий разрядник / В.В. Ашмарин, А.М. Абрамов, В.А. Лоц, А.А. Царев, А.А. Егоров // Авторское свидетельство SU 1557613 A1, 15.04.1990. Заявка № 4463364 от 20.07.1988
12. Ашмарин В.В. Коммутаторы емкостного накопителя энергии для электродинамического ускорителя массы / В.В. Ашмарин // автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 1994. 19 с

Гусаков Д. В., Уразбахтин Р. Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

*Аннотация:* В статье описан алгоритм проектирования отказоустойчивого энергетического преобразователя. В качестве энергетического преобразователя выбрано трансформаторно-выпрямительное устройство с магнитопроводом из аморфного магнитного материала для канала генерирования 270 В летательного аппарата. Разработанный алгоритм учитывает индивидуальные особенности трансформатора и блока электроники, что позволяет повысить точность расчетов и уровня отказоустойчивости системы.

*Ключевые слова:* трансформаторно-выпрямительное устройство, отказоустойчивость, энергетический преобразователь; алгоритм проектирования.

Топливная эффективность, аэродинамические, экономические и экологические преимущества перспективных летательных аппаратов (ЛА) во многом зависят от эффективности системы электроснабжения (ЛА) в целом и ее канала генерирования электроэнергии (КГЭ), в частности, как показал опыт эксплуатации Boeing 787 [1]. Главной отличительной особенностью самолёта В-787 являются электрические системы, которые заменяют большинство пневматических систем, устанавливаемых традиционно на современных самолётах гражданской авиации. Boeing предлагает повысить эффективность эксплуатации ЛА, благодаря преимуществам электрических систем по сравнению с пневматическими вследствие большей эксплуатационной эффективности, получаемой за счёт уменьшения расхода топлива. Задача проектирования компонентов КГЭ ЛА являются одними из первоочередных при создании новых ЛА и модернизации существующих.

В Российской Федерации также осуществляется переход к концепции «Более электрических самолетов» - разработаны генерирующие узлы с высокими удельными характеристиками и с более высоким классом напряжения, которые способны обеспечивать функционирование всех систем с помощью электрической энергии. Однако использование существующей электроники приведет к значительному увеличению массы канала генерирования, вследствие чего, возникает необходимость в применении энергетических преобразователей, которые обеспечили бы питание приводов с



классом напряжения 270 В постоянного тока [2]. Важным аспектом их работы является длительное пребывание в режиме холостого хода, вследствие чего происходит дополнительный нагрев магнитопровода. Для решения этой проблемы наилучшим образом подходят аморфные сплавы, обладающие низкими удельными потерями холостого хода, но их применение в КГЭ ЛА до сих пор не было исследовано.

Вследствие перехода к концепции «Более электрического самолета» значительно повышается ответственность работы канала генерирования и отдельных его узлов. В случае отказа промежуточного звена (каким является энергетический преобразователь (ЭП), это может быть трансформаторно-выпрямительное устройство (ТВУ)), может выйти из строя вся система электроснабжения летательного аппарата. Таким образом вытекает проблема отказоустойчивости и потребуются исследования аномальных режимов работы ЭП с магнитопроводом из аморфного сплава и разработка методов компенсации аварийных ситуаций, при условии их влияния на питающий и питаемый объект (генератор, привод) [3-4].

Для повышения эффективности и отказоустойчивости был разработан алгоритм функционирования отказоустойчивого энергетического преобразователя (рис. 1).

Алгоритм реализуется следующим образом. Задаются параметры ТВУ согласно техническому заданию и выполняются предварительные расчеты, а также моделирование ТВУ совместно трансформатора и блока электроники. Далее расчет разделяется по отдельности для трансформатора и блока электроники с одинаковыми задачами расчета (электромагнитный расчет, тепловой расчет, проверка отказоустойчивости), но с индивидуальными особенностями, которые необходимо учитывать при проектировании.

Электромагнитный расчет для трансформатора должен учитывать число витков, геометрию магнитопровода и материал магнитопровода (это может быть электротехническая сталь, аморфная магнитная сталь, прецизионная магнитно-мягкая сталь, либо совмещенная гибридная сталь). Для блока

электроники электромагнитный расчет подразумевает уточнение типов диодов, проверка качества выходного напряжения и индуктивности сглаживающего дросселя. Далее осуществляется проверка соответствуют ли массогабаритные показатели и удельная мощность трансформатора требованиям ТЗ (это наиболее значимые критерии для летательного аппарата) и проверка массогабаритных показателей и качества выходного напряжения требованиям ТЗ для блока электроники.

Далее должен быть выполнен тепловой расчет. Тепловой расчет трансформатора подразумевает проектирование системы охлаждения (если это необходимо) и уточнение материала обмоток (в случае, если необходимо увеличивать плотность тока на предыдущем шаге). Для блока электроники осуществляется только проектирование системы охлаждения (как правило используются радиаторы охлаждения). В завершении проверяется соответствие требованиям ТЗ.

Важным этапом расчетов является проверка отказоустойчивости как трансформатора, так и блока электроники. Наиболее универсальным способом обеспечения надёжности является резервирование, поэтому возможно исполнение трансформатора с дополнительными обмотками и блока электроники с резервной выпрямительной группой. Отказоустойчивость проверяется для отказа одной или нескольких фаз трансформатора и отказа одного или нескольких диодов блока электроники.

В результате имеем результаты комплексных расчетов отказоустойчивой системы энергетического преобразователя. На основе расчетов можно переходить к прототипированию и верификации расчетов.

Использование данной методики проектирования позволит осуществить расчет высокоэффективного ТВУ летательного аппарата, а также верифицировать его с помощью экспериментального образца с материалами и габаритными размерами, определенными по настоящей методике. Раздельный учет особенностей трансформатора и блока электроники позволяет повысить точность расчетов и уровня отказоустойчивости системы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-38-70096.

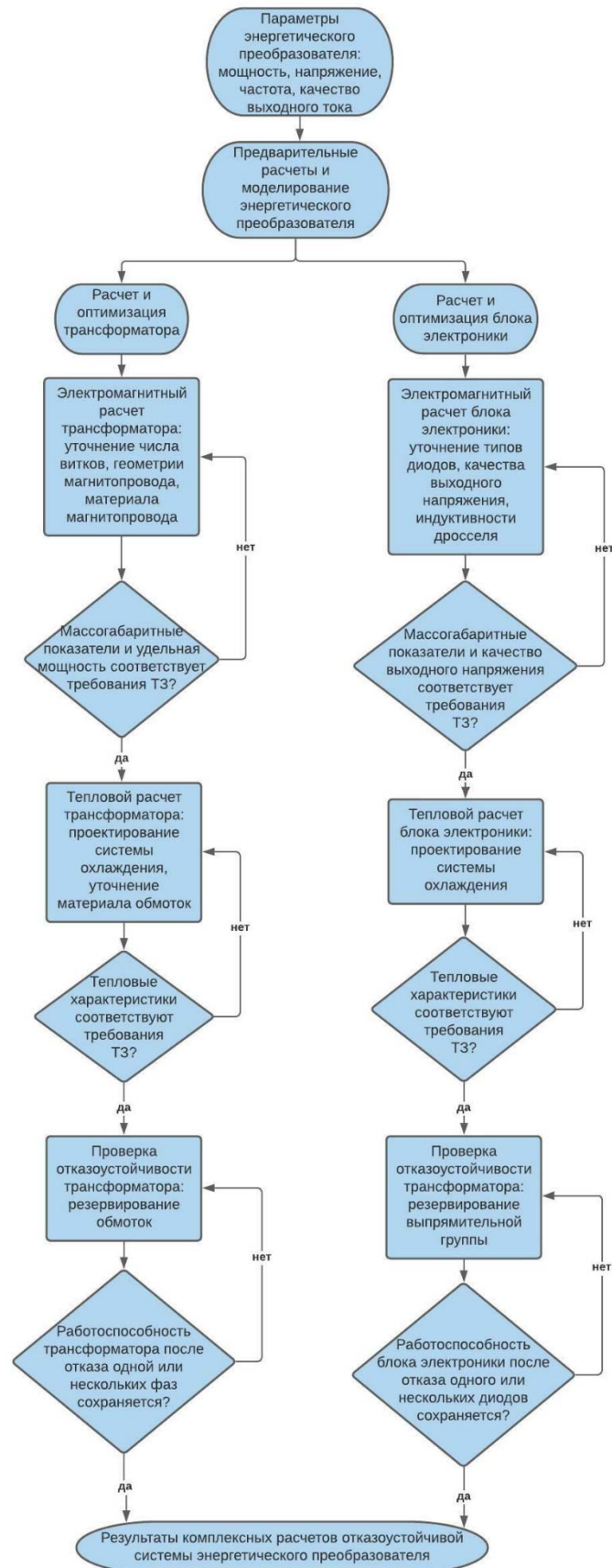


Рис. 1. Алгоритм расчета отказоустойчивого энергетического преобразователя

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Madonna, P. Giangrande, M. Galea, “Electrical Power Generation in Aircraft: review, challenges and opportunities”, IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 3, 2018, pp. 646 – 659, DOI: 10.1109/TTE.2018.2834142.
2. Johannes Brombach, Arno Lücken, Brice Nya, Martin Johannsen, Detlef Schulz, “Comparison of Different Electrical HVDC Architectures for Aircraft Application,” 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, Italy, 16-18 Oct. 2012
3. Denis Gusakov, Denis Masalimov, “Transformer-rectifier unit of overvoltage 270 V for on-board power supply system of aircraft”, 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 27-30 Oct. 2020, DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278413.
4. Denis Gusakov, Ruslan Karimov, Denis Masalimov, “Investigation of the joint operation of an aircraft electric drive and a transformer-rectifier unit with an amorphous alloy magnetic core”, 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 27-30 Oct. 2020, DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278504.

*Юсупова Н. И., Сметанина О. Н., Сазонова Е. Ю., Садретдинова М. В.*  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## **МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА В ЭНЕРГЕТИКЕ**

*Аннотация:* В статье рассматривается задача маршрутизации транспорта с различными ограничениями. Авторами показано, что проблема оптимизации ресурсов может возникать на этапе производства энергии, например, из биотоплива, во время маршрутизации транспортом. В статье представлена постановка задачи транспортной маршрутизации, структура решения задачи и предлагаемый подход. В задаче маршрутизации учитываются следующие ограничения: вместимость транспортных средств, временные окна и прогнозируемый спрос. Решение поставленной задачи позволит снизить затраты на транспортировку и хранение ресурсов.

*Ключевые слова:* транспортная логистика, задачи маршрутизации транспорта, VRP, CVRPTW, прогнозирование спроса, энергетика

## ВВЕДЕНИЕ

Под «энергетическими ресурсами» понимаются источники разнообразных видов энергии, доступные для промышленного и бытового использования в энергетике. Выделяют невозобновляемые, возобновляемые и ядерные ресурсы. В настоящее время, в связи с высокими ценами на невозобновляемые ресурсы и ухудшением экологической ситуации в мире, наблюдается повышение интереса к биотопливу. Так объем рынка биотоплива увеличился на 9% с 2012 по 2020 год. Процесс получения энергии конечным потребителем при использовании биотоплива схематично может быть

представлен следующим образом: сбор биомассы (сахарная свекла, древесина и др.), доставка биомассы к месту переработки, распределение биомассы по производственному пункту получения биотоплива, получение и транспортировка биотоплива к пункту получения энергии, получение энергии и ее транспортировка к конечному потребителю (рис. 1). На рисунке 1 также изображен процесс получения электроэнергии из невозобновляемых ресурсов. При получении электроэнергии возникает вопрос транспортировки ресурсов к ТЭЦ в случае использования нефтяных ресурсов, при использовании биомассы вопрос доставки грузов возникает два раза при транспортировке биомассы к пункту производства биотоплива, и при транспортировке биотоплива к ТЭЦ. При этом на транспортные расходы уходит около 30% затрат на производство. В связи с чем, можно сказать, что нахождение рациональных маршрутов является актуальной задачей. Кроме вопроса о рациональных маршрутах доставки грузов, возникает проблема количества доставляемого товара, так как в случае простоев пункты производства затрачивают дополнительные деньги на хранения сырья. В связи с вышесказанным в статье рассматривается задача маршрутизации транспорта (ЗМТ) с учётом грузоподъемности, временных окон и прогнозируемого спроса, решение которой позволит сократить расходы на транспортировку и хранение ресурсов.

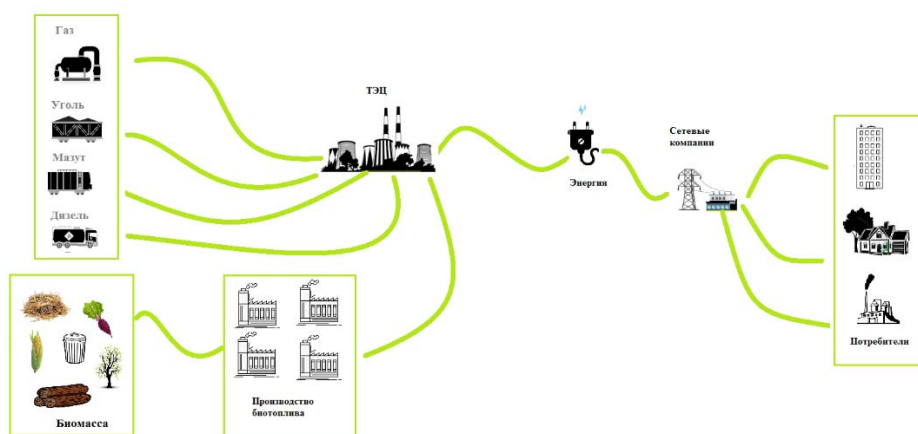


Рис. 1. Получение электроэнергии

## СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА

Рассмотрим содержательную постановку задачи нахождения рациональных маршрутов с ограниченной грузоподъемностью, временными окнами и прогнозируемым спросом. Дано: количество транспортных средств, имеющихся у перевозчика; грузоподъемность транспортного средства; координаты депо, с которого будет осуществляться доставка; координаты клиентов, нуждающихся в доставке; временные окна каждого клиента, в пределах которых они хотели бы принять доставку; предыдущие значения спроса каждого из клиентов за определенный период времени.

Необходимо спрогнозировать значение спроса на основе предыдущих показателей для каждого клиента. Построить маршрут минимальной суммарной стоимости, начинающийся и заканчивающийся в депо, при котором будут обслужены все клиенты в пределах своего указанного временного окна или с минимальным опозданием. Количество транспортных средств, участвующих в развозе, должно быть минимальным. Также необходимо представить имеющиеся маршруты в графическом виде на карте и в виде списка последовательности посещения клиентов для каждого задействованного транспортного средства.

Авторы статьи имеют опыт в решении задач транспортной логистике [1-2].

## ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА

Формальная постановка задачи представлена в виде диаграммы методологии IDEF0. На рисунке 2 показана структура решения задачи.

Входными данными в диаграмме являются: географические координаты депо; данные о транспортных средствах: количество и грузоподъемность; информация о клиентах: координаты пунктов доставки, названия, границы временных окон, значения прошлых запросов за некоторый период времени.

Выходными данными в диаграмме являются: маршруты, отображенные на карте, и маршруты в виде последовательности посещения клиентов.

Механизмами выступают алгоритмы прогнозирования спроса и маршрутизации транспорта, а также программно-технические средства. К управляющим воздействиям относятся требования к организации входных и выходных данных.

Декомпозиция формальной постановки задачи состоит из трёх блоков. На этом этапе обработки исходных данных происходит проверка правильности организации входных данных, прогнозирование спроса каждого из клиентов, вычисление расстояний между клиентами и на основе этих расстояний генерация матрицы времён поездок. На этапе нахождения рационального маршрута применяется алгоритм маршрутизации транспорта для составления маршрута. На этапе визуализации результата маршрутизации происходит отображение результатов решения задачи в соответствии с требованиями.

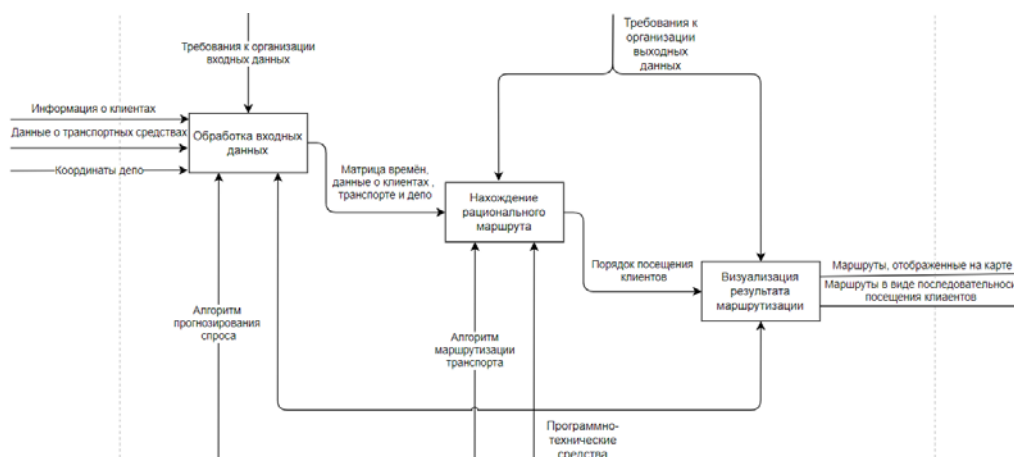


Рис. 2. Структура решения задачи

## ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА CVRPTW С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРУЕМОГО СПРОСА

Решение задачи маршрутизации транспорта CVRPTW с учетом прогнозируемого спроса разделено на два этапа, на первом этапе решается задача прогнозирования спроса, на втором этапе решается задача маршрутизации транспорта. Рассмотрим каждый этап подробнее. При выборе модели для получения спроса каждого клиента было проанализировано 4

модели: ARMA, ARIMA, SES, HES. Для сравнения методов решения задачи прогнозирования спроса использовались следующие метрики: средняя абсолютная ошибка и среднеквадратичная ошибка. Авторами были протестированы все модели с помощью языка программирования Python на данных с предыдущими значениями спроса. Эксперимент показал, что наилучшим является метод двойного экспоненциального сглаживания, поэтому для получения спроса для клиента предлагается использовать модель двойного экспоненциального сглаживания, также называемая методом Хольта. Для второго этапа авторами был проведен сравнительный анализ точных и неточных методов (эвристические, мета-эвристические). Для решения поставленной задачи исследовании использовался модифицированный метод ближайшего соседа, так как он выдаёт допустимое в заданных условиях решение и достаточно прост в реализации.

Для разработки программного решения в исследовании был использован объектно-ориентированный язык программирования C#. Разработка приложения проводилась в интегрированной среде программирования Visual Studio 19. Для расчёта матрицы расстояний между клиентами было необходимо воспользоваться инструментом, позволяющим строить маршруты и получать информацию о них. Для решения этой задачи была выбрана библиотека Itinero. Для отображения карт была выбрана дополнительная библиотека GMap.NET. GMap.NET – это простой серверный элемент управления, позволяющий легко внедрять карты google в любой проект C#. Интерфейс программного решения представлен на рисунке 3. Авторами был проведен вычислительный эксперимент, который показал, что программа работает успешно. Время ожидания расчёта матрицы расстояний при максимально допустимом количестве клиентов занимает чуть больше минуты, однако, учитывая, что в этом случае находится длина 1275 маршрутов, результат является допустимым.



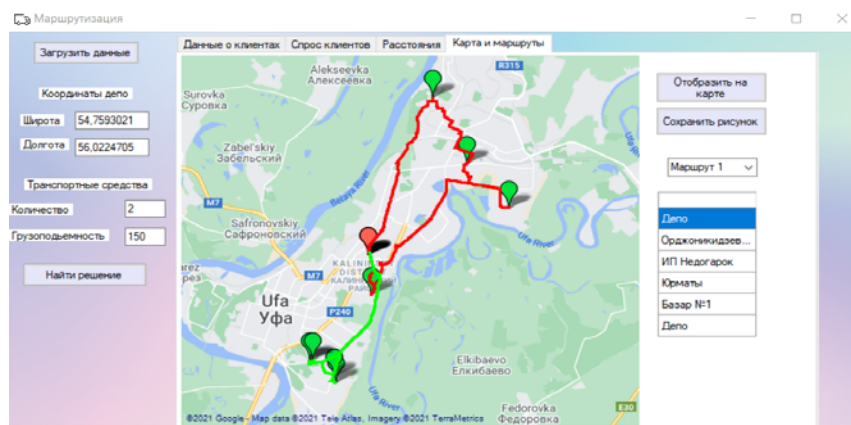


Рис. 3. Интерфейс программного решения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами работы проведен анализ предметной области. Анализ показал, что задача маршрутизации транспорта с учётом прогнозируемого спроса может быть применена в энергетической промышленности на этапе доставки грузов к пунктам получения биотоплива и пунктам получения электроэнергии. В работе проведён обзор существующих программных решений, решающего задачу маршрутизации транспорта. Выяснено, что не существует программ, решающих задачу маршрутизации транспорта CVRPTW с учетом прогнозируемого спроса. Разработано математическое обеспечение задачи маршрутизации транспорта CVRPTW с учетом прогнозируемого спроса в виде математической модели задачи прогнозирования спроса и маршрутизации транспорта, алгоритмов решения задач. Для решения задачи прогнозирования спроса были рассмотрены модели: ARMA, ARIMA, SES, HES, наилучшей моделью оказалась HES. Для задачи маршрутизации транспорта был применен алгоритм ближайшего соседа. Разработано программное обеспечение для решения задачи маршрутизации транспорта CVRPTW с учетом прогнозируемого спроса. Для разработки были использованы следующие технологии: язык программирования C#; библиотеки Itinero, GMap.NET; Open Street Map. Проведён вычислительный эксперимент, направленный на определение эффективности разработанного алгоритма и проанализированы полученные результаты вычислительного эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] G. Kovács, N. Yusupova, O. Smetanina, and E. Rassadnikova, “Methods and Algorithms of Rational Routes Determination for Vehicle Routing Problem with Time Windows and Other” in Pollack Periodica, 2018, V. 13, №. 1, pp. 65-76

[2] Технологии искусственного интеллекта и машинного обучения в задачах семантического представления и анализа данных: монография/ Юсупова Н. И., Сметанина О. Н., Гаянова М. М. – М.: Инновационное машиностроение, 2020. - 242 с.

*Речкалов А. В.<sup>1</sup>, Артюхов А. В.<sup>1</sup>, Куликов Г. Г.<sup>2</sup>, Новиков В. Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «ОДК»

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет

### **КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ В ПРОЦЕССЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

*Аннотация:* В рамках базовых понятий системной инженерии исследован и предложен подход к формализации и интеграции существующих слабоструктурированных моделей производственного процесса и его системы управления путем последовательной цифровой трансформации. Определены необходимые методические и информационные требования для обеспечения идентифицируемости, прослеживаемости и управляемости производственных процессов предприятий для принятия решений (ПР) при планировании и управлении.

*Ключевые слова:* производственные системы; цифровой двойник; система поддержки принятия решений; умные фабрики; системы планирования.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Четвертая промышленная революция Industry 4 предполагает кардинальное преобразование и в области систем управления производственными системами (ПС), потреблением, транспортировкой и поставками ресурсов. Инфраструктура этих систем определяется, прежде всего, применением современных информационных технологий (ИТ). Интеграция цифровых ИТ нового поколения требует трансформации информационных метамоделей (ИМ) управления предприятиями, метамоделей хозяйственной деятельности и в целом бизнес-модели. [1- 3].

В целом трансформация индустриальных моделей в промышленности и дальнейшее углубление применения цифровых технологий становятся

принципиальным направлением развития предприятий и промышленных комплексов.

Однако отметим, что эффективное развитие промышленного производства, и, в частности, машиностроительного, характеризуется, прежде всего, четким определением его объективных границ, обусловленных технологическими процессами и необходимыми ресурсами. Современные ИТ позволяют не только сопоставить указанные реальные объекты и их связи с ИМ, но и формировать новые виртуальные объекты и связи. При неуправляемом развитии системы это повышает энтропию всей производственной системы, то есть увеличивает хаос. Поэтому цифровую трансформацию и развитие ПС необходимо осуществлять в соответствии с законами как объективного, так и необходимого их разнообразия.

В последние годы во главу угла развития информационных технологий в целом и искусственного интеллекта, в частности, ставится технология цифрового двойника (digital twin - ЦД), формально реализующего в рамках инженерной диалектики логический закон исключения (включения) третьего. В традиционных решениях (без использования ЦД) производственные процессы планируются на основе заранее произведенных расчетов в функциональной (алгоритмической) форме, которые обновляются ежемесячно или ежеквартально. В реальном производстве запланированные процессы имеют отклонения от заранее рассчитанного плана из-за внутренних и внешних воздействий и могут принимать форму неявно выраженных функций, определяемых дифференциально–интегральными уравнениями. Цифровой двойник должен воспринимать (учитывать) самые разные ситуации, в том числе и нештатные – неявно выражаемые, через консолидированные данные, которые можно использовать для анализа и прогноза. Данные о состоянии производства собираются в единую систему в режиме реального времени, обрабатываются, анализируются и позволяют определить узкие места и отклонения в производственном процессе, что, в свою очередь, позволяет устранять проблемы, связанные с отклонениями.

Такой цифровой двойник позволит в виртуальном пространстве адекватно смоделировать изменение состояния и характеристик всего производственного процесса.

## 2. ЛОГИКО-СИМАНТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Если определить понятие цифрового двойника полно (рефлексивно), то цифровой двойник – это цифровое представление реального объекта или системы с его виртуальным дополнением.

Как отмечается в [2], первоначально концепция ЦД в менеджменте была озвучена Майклом Гривсом на PLM (Product Lifecycle Management) форуме в Мичиганском университете в начале 2002 г. и позднее, в 2003 г., была представлена на конференции по PLM. Суть концепции состояла в том, что каждый объект можно представить в виде физической и виртуальной системы так, что виртуальная система отображает физическую, и наоборот. При этом подчеркивается, что концепция взаимодействия физического продукта в реальном мире, его цифровой копии в виртуальном мире и наличия информационной связи между ними, объединяющей виртуальное и материальное пространство, по сути, и отображает идею ЦД. При этом отмечается, что понятие «ЦД» находится еще в стадии формирования и унификация производных терминов.

В рамках технологии ЦД для физического объекта: изделия, единицы оборудования или процесса - в определенных для них точках зрения, аспектах, сечениях, срезах и т.д. создается математическая модель, которая в дальнейшем используется для анализа поведения объекта или процесса как взаимодействия совокупности объектов. Цифровая модель, как и соответствующий объект, не может быть статичной, она должна сохранять и свойство рефлексии. Она должна постоянно обновляться, чтобы максимально полно соответствовать текущему состоянию объекта во внешней среде. Именно максимальное соответствие ЦД моделируемому объекту, находящемуся под воздействием

внешней среды, создает предпосылки для решения принципиальной задачи - моделирования поведения объекта в будущем.

«Цифровой двойник» (Digital Twin) – формулируется как фундаментальное понятие «цифрового производства» (Smart Factory), которое следует связывать как непосредственно с самим изделием, в этом случае применяется термин «цифровой двойник» изделия, так и с процессом изготовления изделий – в этом случае следует использовать термин «цифровой двойник» производственной системы [4, 5, 11].

Профессор А. И. Боровков выделяет два типа цифровых двойников – цифровые двойники объекта/продукта (Digital Twin, DT-1) и цифровые двойники производства (Digital Twin, DT-2), которые в основе своей имеют «умную» модель, учитывающую особенности конкретного производства в форме предикатного (терминально - логического) выражения. То есть «умная» математическая модель учитывает влияние производственных операций, таких как литье, штамповка, сварка, сборка и т. д. [4]. Очевидно, что цифровой двойник изделия в процессе производства не существует сам по себе. Он связан со множеством цифровых двойников других объектов, участвующих в процессе производства. Для представления такой совокупности применяется понятие "умной фабрики" (Smart Factory), которое следует связывать как с самим изделием (в этом случае применяется термин "цифровой двойник изделия"), так и с процессом изготовления изделий. В этом случае используется термин "цифровой двойник производственной системы" [5]. Концептуальной схемой верхнего уровня представления таких моделей, как правило, являются семантические атрибутивные описания в форме гипертекстовых и продукционных БЗ, составляющих основу структуры ЭС производственного управления.

Цифровой двойник производственной системы — это виртуальное воспроизведение рабочего состояния реальной производственной системы в цифровом пространстве. По сути, это набор математических моделей в их теоретико–множественной и функциональной нотациях с применением

функций в явной и не явно выраженных (уравнений) формах дискретной математики, описывающих состояние объекта и всех его элементов. В общем случае цифровой двойник включает математические модели основных физических объектов (прежде всего ресурсов) и математические модели их взаимодействия в производстве (математические модели процессов, описывающие все варианты взаимодействия этих ресурсов).

Основным элементом производственной системы является производственный процесс (ПП), классическая структура которого представлена на рисунке 1 [8], определяемого как процесс взаимодействия производственных ресурсов: Средств труда (СТ), Предмета труда (ПТ) и Трудовых ресурсов (ТР), в результате которого реализуется цель производственного процесса - Продукт (ПР).

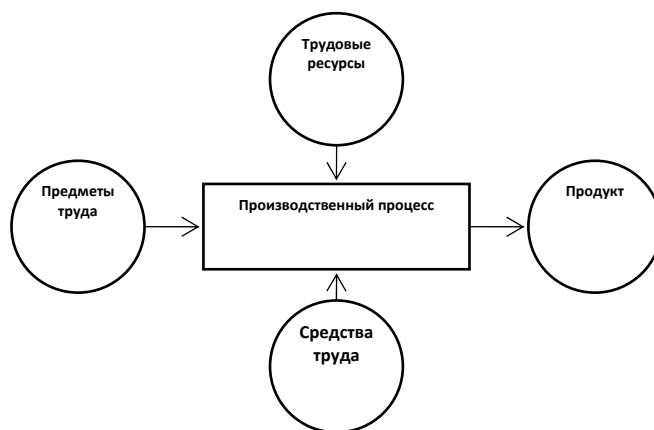


Рис. 1. Общее представление производственного процесса

Процесс производства как физический объект и его цифровой двойник вместе составляют диалектическую пару и могут быть объединены понятием «Производственная система». Исходя из этого положения можно определить свойство цифрового двойника производственного процесса как виртуальное воспроизведение не только рабочего состояния реальной производственной системы в каждый момент времени, но и прогноза (плана) этого состояния во времени на основе принципа управляемого Марковского процесса (цепи Маркова), когда прошедшее состояние определяет настоящее, а настоящее определяет будущее состояние, которое при сравнении с целевыми показателями образует контур обратной связи.

В основе ЦД производственного процесса лежит модель, учитывающая реальные параметры технологических процессов, материалов, оборудования, инструмента и трудовых ресурсов, или ЦД технологического процесса, который является и основой организации собственно производственного процесса.

Цифровой двойник производственного процесса как математическая категория множеств может быть построен на базе набора цифровых двойников элементов процесса [2]: ЦД компонента (Component Twin) включает предметы труда - материалы, полуфабрикаты, комплектующие, детали, сборочные единицы; ЦД актива (Asset Twin) включает активы ресурсов производственной системы - основные средства, трудовые ресурсы, инструменты; ЦД комплексного объекта (System Unit Twin) включает результат производственного процесса или продукт, используемый в другом процессе как ресурс или потребляемый человеком; ЦД производственного процесса (Process Twin) отражает процесс взаимодействия ресурсов – СТ, ПТ и ТР с целью получения ПР.

В общем представлении ЦД технологического процесса содержит пять групп моделей: *Группа моделей продукции*, включающая модели взаимосвязи предметов труда в рамках продукта, содержащая количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики; *Группа моделей предметов труда*, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного предмета труда и связь с технологической операцией; *Группа моделей средств труда*, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного ресурса, определяющих участие ресурсов в технологической операции; *Группа моделей трудовых ресурсов*, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного ресурса, определяющих участие ресурсов в технологической операции; *Группа моделей технологических операций*, включающая модели взаимосвязи предметов труда и ресурсов, формирующих технологический процесс, включая количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики, определяющих

участие в процессе производства; *Группа моделей технологических маршрутов*, формирующих последовательность выполнения операций.

Совокупность данных цифровых двойников представляет собой модель технологического процесса или статическую модель цифрового двойника производственного процесса. Исходя из вышесказанного можно определить, что Цифровой двойник ПП содержит статическую модель состояния и взаимосвязи производственных ресурсов (модель технологического процесса) и динамическую модель планирования и управления производством, отражающую взаимодействие ресурсов в процессе производства продукции (рис. 2), в результате чего реализуется контур управления процессом производства продукции.

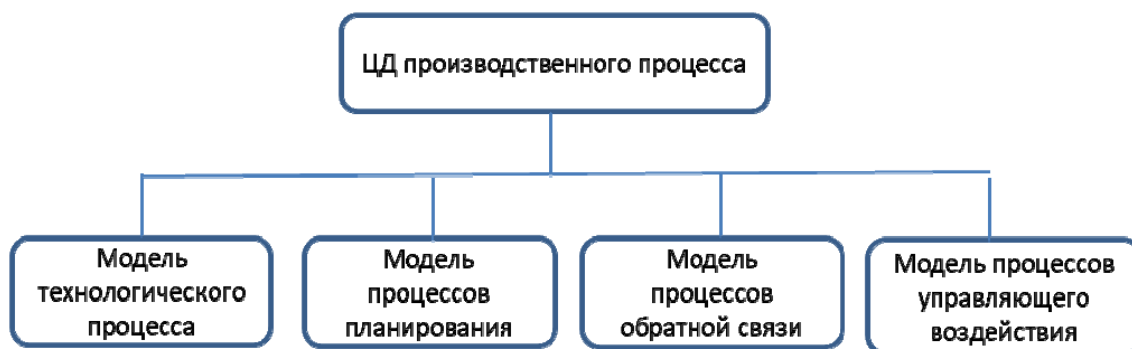


Рис. 2. Концептуальная модель цифрового двойника производственного процесса

Производственная система, состоящая из производственного процесса и совокупности ЦД, по определению является элементом системы более высокого уровня, которую можно сформулировать как Бизнес-система. Физическим объектом бизнес-системы кроме процесса производства продукции естественным образом становятся процессы обеспечения всем набором ресурсов (обеспечивающие процессы), необходимых для осуществления производственного процесса, обеспечения финансовыми ресурсами, стратегического планирования и др. В соответствии со структурой выделенных объектов и формируется состав соответствующих ЦД.



### 3. ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

В соответствии с законом Эшби оптимальное управление достигается при условии соответствия разнообразия управляющего воздействия разнообразию управляемого. Данное свойство обеспечивается двумя факторами: полным знанием поведения управляемой системы со стороны управляющей системы и способностью превратить это знание в адекватное отражение в рамках цифрового двойника, т. е. обеспечить формируемые модели требованиям идентифицируемости и прослеживаемости. Для обеспечения идентифицируемости моделей производственных ресурсов необходимо определить набор характеристик, определяющих состояние ресурса.

В основе построения моделей организации лежит нормативно-справочная информация. Совокупность моделей нормативно-справочной информации, содержащая характеристики и параметры элементов производственного процесса предприятия и их взаимосвязей, отражает количественные параметры преобразования предметов труда для производства единичного продукта и составляет основу для идентификации статической модели производственного процесса. Ресурсы и предметы труда, технологические маршруты и операции, лежащие в основе реального производственного процесса в виде структурированного представления всего многообразия, классифицированы и документированы в регламентах Единой Системы Технологической Документации (ЕСТД) и могут быть приняты за основу классификации элементов производственного процесса при формировании модели производственного процесса. Данные стандарты определяют как состав и характеристики элементов производственного процесса, так и состав и характеристики их взаимосвязей в процессе преобразования предметов труда в готовое изделие и могут быть представлены в виде концептуальной модели технологического процесса (Рис. 3).

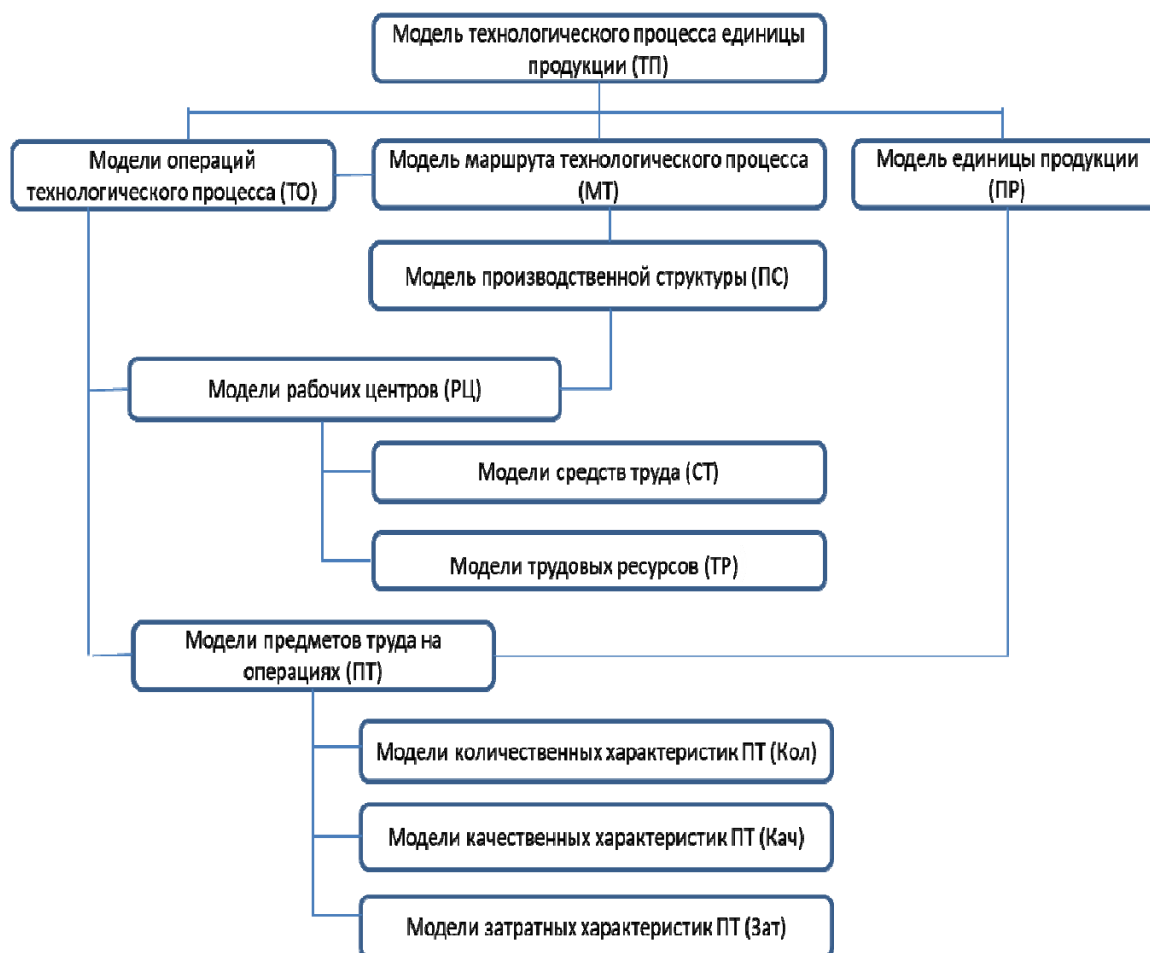


Рис. 3. Концептуальная модель технологического процесса единицы продукции

Концептуальная модель технологического процесса (статическая модель) единицы продукции, представленная на рисунке 3, может быть описана с учетом положений, изложенных в [9, 10].

*Модель технологического процесса единицы продукции (ТП)* – составная часть модели производственного процесса, содержащая информацию о целенаправленных действиях по изменению и (или) определению состояния предмета труда. Технологический процесс может быть отнесен к готовому изделию, его составной части или к методам обработки, формообразования и сборки. В основе технологического процесса лежит определенным образом организованная совокупность производственных ресурсов, документально отраженная в соответствии со стандартами единой системы технологической документации (ЕСТД) и представляющая собой потенциальную возможность преобразования предметов труда в продукт. Модель технологических процессов единицы продукции формируется на основе интеграции моделей

технологических операций, маршрута технологического процесса и единицы продукции (спецификации продукта).

*Единица продукции (ПР)* - предмет труда, определенный как конечная продукция, являющаяся, по существу, целью и результатом производственного процесса. Единица продукции - отдельный экземпляр штучной продукции или определенное в установленном порядке количество нештучной или штучной продукции. Модель единицы продукции представляет собой спецификацию и технические условия изделия и определяет производственный состав продукта - парные отношения материалов, деталей и сборочных единиц, необходимых для изготовления и сборки изделия в порядке уровней входимости, их применяемости и количественного состава. Модель единицы продукции сформирована на основе состава (классификации) ПТ и разнообразия вариантов входимости и прослеживаемости и содержит десять вариантов связей входимости "Подчиненный ПТ – ПТ Родитель", обеспечивающих прослеживаемость ПТ в производственной спецификации и формирующих спецификацию уникальной единицы продукта.

*Модель технологического маршрута (ТМ)* - сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других технологических документах. Модель технологического маршрута формируется на сочетании состава технологических операций и модели производственной структуры предприятия.

*Модель предметов труда (ПТ)* представляет собой описание набора состояний преобразования исходных ПТ (материала, комплекта ПТ) в процессе выполнения технологических операций, и описания конечного состояния этого ПТ, готового для использования в формировании другого ПТ или продукта.

*Предметы труда (ПТ)* — это взаимосвязанные объекты производственного процесса, полностью овеществляющиеся в конечном продукте (изделии) и сохраняющие Количественные характеристики ПТ, Качественные характеристики ПТ, Затратные характеристики ПТ.

*Модель технологической операции (ТО)* связывает модель количественных, качественных и стоимостных характеристик состояния ПТ на операции и, через модель технологического маршрута, с моделью РЦ. Технологическая операция (ТО) - законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте, обеспечивающая преобразование элементарного ресурса - предмета труда или совокупности предметов труда в другой предмет труда или продукт. В основе содержания ТО лежит технологический метод.

*Модель производственной структуры (ПС)* сформирована на основе набора типовых вариантов рабочих мест и сгруппированных элементов организационной структуры. Производственная структура представляет собой иерархию обособленных подразделений предприятия

*Модель рабочих центров (РЦ)* отражает организованную совокупность взаимозаменяемых рабочих мест. В процессе производства средства труда и рабочие в качестве элементарных ресурсов выступают как взаимоувязанные или совокупные условия реализации производственного процесса, которые можно представить в виде совокупного ресурса "рабочее место". Рабочее место - первичная ячейка производственной структуры предприятия, представляющая собой часть производственной площади, оснащенной и оборудованной всем необходимым для выполнения определенной работы и обслуживаемая одним или несколькими рабочими.

*Модель средств труда (СТ)* – доступный ресурс, возможность использования орудий производства, необходимых для осуществления технологического процесса (оборудование, оснастка, инструмент, производственные площади).

*Модель трудовых ресурсов (ТР)* отражает возможность целенаправленных действий человека (рабочего) по реализации производственного процесса, связанных с затратами нервно-мышечной энергии в процессе преобразования предмета труда. Трудовые ресурсы –

производственные рабочие и контролеры, непосредственно занятые в производстве.

#### 4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ

Планирование производственного процесса – ключевая функция цифрового двойника, модель которой для машиностроительного производства наиболее полно реализована в рамках стандартного решения MRP II. MRP II (англ. manufacturing resource planning — планирование производственных ресурсов) — стратегия производственного планирования, обеспечивающая как операционное, так и финансовое планирование производства.

MRP II обеспечивает детальное планирование производства предприятия, включая учёт заказов, планирование загрузки производственных мощностей, планирование потребности во всех ресурсах производства (материалы, сырьё, комплектующие, оборудование, персонал), планирование производственных затрат, моделирование хода производства, его учёт, планирование выпуска готовых изделий, оперативное корректирование плана и производственных заданий. Т.о., MRP II реализует не только модели планирования, но и модели обратной связи, т.е производственного и финансового учета.

Модели планирования и обратной связи реализуются с использованием следующих функций:

- Sales and Operation Planning (планирование продаж и операций).
- Demand Management (управление спросом).
- Master Production Scheduling (составление плана производства).
- Material Requirement Planning (планирование материальных потребностей).
- Bill of Materials (спецификации продуктов).
- Inventory Transaction Subsystem (управление складом).
- Scheduled Receipts Subsystem (плановые поставки).
- Shop Floor Control (управление на уровне производственного цеха).

- Capacity Requirement Planning (планирование производственных мощностей).
- Input/output control (контроль входа/выхода).
- Purchasing (материально-техническое снабжение).
- Distribution Resource Planning (планирование ресурсов распределения).
- Tooling Planning and Control (планирование и контроль производственных операций).
- Financial Planning (управление финансами).
- Simulation (моделирование).
- Performance Measurement (оценка результатов деятельности).

Взаимодействие ПТ и РЦ при выполнении производственной операции является ключевым моментом производственного процесса и основным объектом процесса управления производством. Разнообразие характеристик такого взаимодействия, сформулированное в [9, 10] определяет разнообразие моделей планирования и возможность их стандартизации и унификации в системах управления производством.

## 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Основываясь на моделях, описанных в разделах 2, 3, необходимо идентифицировать и определить модели принятия решения для формирования корректного управляющего воздействия. Событием для запуска процесса принятия решения в цифровой системе управления производством является формирование системой сообщений об исключительной ситуации. Сообщения об исключительной ситуации формируются в случае отклонений от нормального хода процессов, в том числе как прогнозируемое отклонение в будущем. Задача ЛПР заблаговременно идентифицировать возникающие отклонения и выработать решение, которое поможет локализовать возникшие

или намечающиеся отклонения. С точки зрения концепции построения цифрового двойника подразумевается моделирование принимаемых решений не на реальных процессах, а предварительная проработка принимаемых решений на моделях, рисунок 4. [10].

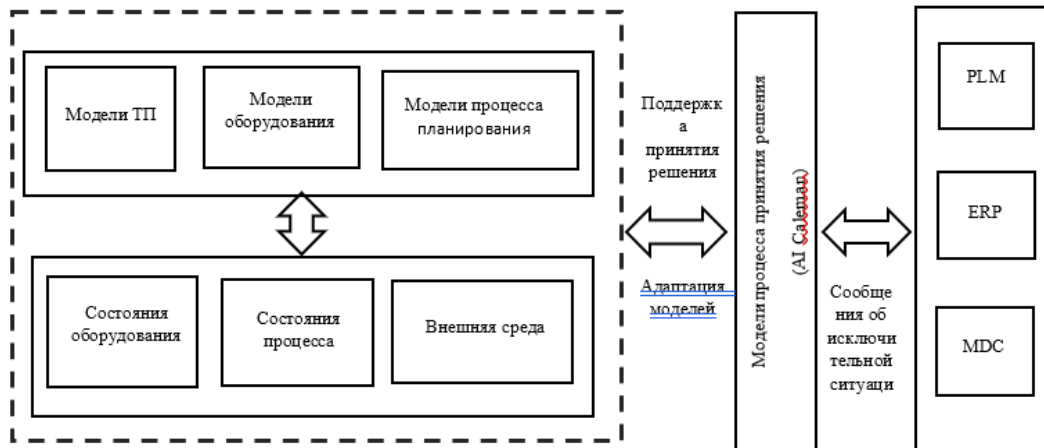


Рис. 4. Структура системы СППР

На основе изучения особенностей машиностроительных производств, методов и средств организационно-технологического проектирования предлагается формализовать знания о предметной области, используя обобщенную онтологию:  $O=(o_i^1 \ o_j^2 \ o_k^3)$  где,  $O$  - обобщенная онтология описания объектов предметной области и процессов принятия решений при организационно-технологическом проектировании,  $i = \{1,2,...,n\}$  - онтология технологических процессов,  $j = \{1,2,...,m\}$  - онтология организации производства,  $k=\{1,2,...,p\}$  - онтология процессов принятия решения.

Рассматриваемые процессы принятия решений и модели представления знаний нуждаются в создании соответствующих методов, инструментальных средств проектирования и программной реализации создаваемых систем поддержки принятия решений (СППР). В качестве такой платформы, например, можно рассмотреть платформу Infor Coleman AI — комплексное решение с использованием машинного обучения, которое функционирует на уровне, предшествующем уровню бизнес-приложений (ERP, PLM, MDC). Coleman AI

осуществляет сбор и анализ данных внутри предприятия и с помощью ML-алгоритмов повышает эффективность различных бизнес-процессов — таких как управление задачами, управление складом и складскими остатками, оптимизация маршрутов, прогнозы по профилактическому обслуживанию производственного оборудования, корректировка производственных планов и т.п. [12]. Искусственный интеллект платформы обучается на данных предприятия, характерных для предметной области, функционирующих в рамках модели представления знаний о производстве в виде онтологий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и исследован формализованный подход к системному моделированию процессов планирования и управления, основанный на концепции цифрового двойника дискретных производственных процессов. Показано, что данный подход и модели могут быть применены для решения задач цифровой трансформации существующих автоматизированных систем управления как в машиностроении, так и в энергетике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Официальный документ: Intelligent Twins Совместное создание интеллектуальных двойников и построение мира интеллектуальных технологий
- [2] Шваб К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб — «Эксмо», 2016 — (Top Business Awards) ISBN 978-5-699-90556-0
- [3] Хузмиев И.К. Информационные технологии – инфраструктура четвертой промышленной революции. <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-tehnologii-infrastruktura-chetvertoy-promyshlennoy-revoljutsii/viewer>.
- [4] Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.
- [5] Цифровой двойник (digital twin). <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoy-dvojniki-digital-twin>
- [6] Балашов А.И. Производственный менеджмент (организация производства) на предприятии. ' СПб.: Питер, 2009. ' 160 с
- [7] Е.Б. Фролов MES – базис для создания «цифрового двойника». <https://www.e-executive.ru/management/practices/1989564-mes-bazis-dlya-sozdaniya-tsifrovogo-dvojnika>
- [8] К. Маркс Капитал. Том первый. /К.Маркс, Ф.Энгельс - Соч., 2-е изд., Т.23. М.: Изд-во политической литературы, 1960. - 907 с.



- [9] Артюхов А.В. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ. 05.02.22 – Организация производства (машиностроение) Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.
- [10] Зориктуев В.Ц., Новиков В.Н. Система поддержки принятия решений при организационно-технологическом проектировании с использованием онтологий. Журнал Автоматизированные технологии и производства . Магнитогорский государственный технический университет, номер: 1 (7) 2015 стр. 46-49 (elibrary id: 23441396 ).
- [11] Е.Б. Фролов, А.С. Климов, Зин Мин Хтун MES — основа для создания «цифрового двойника» производственной системы // Вестник МГТУ СТАНКИН, №2 (49), 2019. С. 52-56.
- [12] The Future of the Future: Cognitive Artificial Intelligence. <https://www.infor.com/resources/the-future-of-the-future-cognitive-artificial-intelligence>

*Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*Аннотация:* Анализируется математическая модель разрядных процессов в низковольтных емкостных системах зажигания в аварийном режиме релаксационных колебаний на основе общего метода оценки устойчивости автоколебаний в электрических цепях. Получено условие предотвращения аварийного режима релаксационных колебаний, даны рекомендации по выбору параметров разрядных цепей низковольтных емкостных систем зажигания, обеспечивающих требуемую эффективность.

*Ключевые слова:* система зажигания, разрядные процессы, аварийный режим.

Для обеспечения требуемого уровня надежности емкостных систем зажигания газотурбинных двигателей используются практически все известные методы повышения надежности применительно к электротехническим устройствам - резервирование, введение параметрической избыточности, нейтрализация негативных процессов, снижающих ресурс работы отдельных элементов, соблюдение регламента технического обслуживания и ремонта, оптимизация параметров, противоречиво влияющих на показатели эффективности и надёжности, предотвращение возможных аварийных режимов работы на стадиях исследования и проектирования [1, 2]. Особую сложность вызывает исключение нестандартных аварийных режимов работы, не связанных с отказами отдельных элементов.

В низковольтных емкостных системах зажигания, содержащих преобразователь, заряжающий через выпрямитель накопительный конденсатор, и разрядную цепь с двумя нелинейными элементами – искровым разрядником и полупроводниковой свечой, возможны два нестандартных аварийных режима – режим утечки тока и режим релаксационных колебаний. Оба аварийных режима проявляются в отсутствии искрообразования в полупроводниковых свечах, причем наблюдаемые признаки аварийных режимов проявляются по-разному.

Признаки режима утечки тока таковы [2]:

- в полупроводниковой свече отсутствует искрообразование;
- искровой разрядник находится в непрерывном проводящем состоянии;
- зарядный ток от преобразователя протекает через разрядник и свечу.

На рис. 1 показаны характерные осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе  $U_C(t)$ , разрядного тока  $I(t)$  и напряжения в полупроводниковой свече  $U_{СВ}(t)$  низковольтной емкостной системы зажигания в нормальном режиме работы, а на рис. 2 – осциллограммы разрядного тока и напряжения в свече в режиме утечки тока.

На рис. 1 обозначено:  $t_{ПС}$  – длительность подготовительной стадии разряда в полупроводниковой свече;  $t_{И}$  – длительность искровой стадии разряда.

Как следует из рис. 2, подготовительная стадия разряда не переходит в искровую, разрядный ток достигает определенного значения, далее накопительный конденсатор разряжается через непробившуюся свечу, разрядный ток уменьшается. После этого возможны два случая: в первом ток через свечу становится равным среднему току заряда накопительного конденсатора; во втором при достижении некоторой величины ток прекращается, разрядник гаснет. В первом случае устанавливается устойчивый режим утечки тока, длительность протекания постоянного тока через свечу может быть значительной. Второй случай характеризует пропуск разряда в свече, далее разрядные процессы в системе зажигания могут протекать обычным образом без отклонения от нормы.

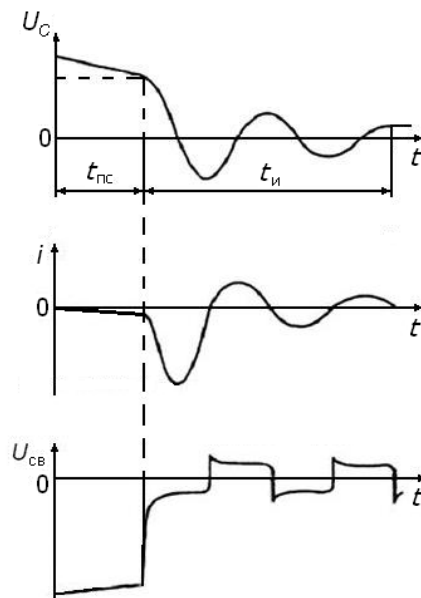


Рис. 1. Характерные осциллограммы разрядных процессов

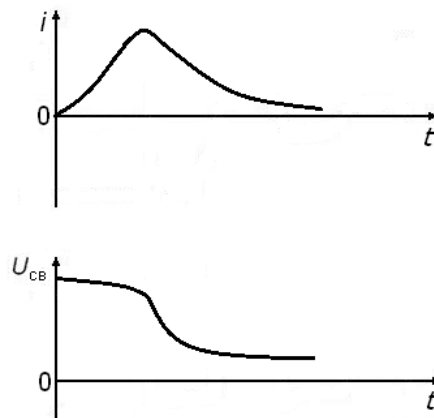


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока и напряжения в свече в режиме утечки тока

Опыт разработки и исследования емкостных систем зажигания показал, что режим утечки тока может возникнуть при применении разрядников с низким пробивным напряжением, при увеличении междуэлектродного зазора полупроводниковых свечей в процессе эксплуатации, при заливании свечей топливом в камерах сгорания и пусковых воспламенителях, т. е. во всех случаях, связанных с увеличением длительности подготовительной стадии разрядов в полупроводниковых свечах [3, 4].

Для предотвращения аварийных режимов утечки тока принимаются меры, направленные на сокращение длительности подготовительной стадии разряда, в том числе повышение пробивного напряжения разрядников, увеличение

емкости накопительных конденсаторов, шунтирование разрядников дополнительной емкостью, применение активизаторов.

Другой специфический аварийный режим – режим релаксационных колебаний – проявляется в следующем:

- в свече отсутствует искрообразование;
- разрядник работает в импульсном режиме с повышенной частотой;
- напряжение на накопительном конденсаторе меняется по закону, показанному на рис. 3, где  $U_0$  – напряжение пробоя разрядника,  $U_1$  – напряжение гашения разрядника. Как следует из рис. 3, в зарядно-разрядной цепи возникают автоколебания.

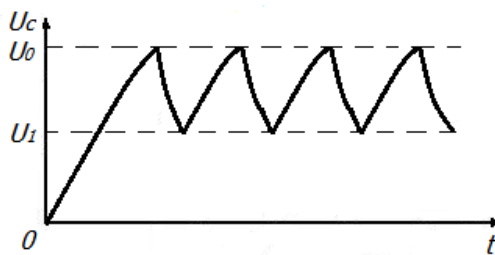


Рис. 3. Напряжение на накопительном конденсаторе в режиме релаксационных колебаний

Предрасположенность к режиму релаксационных колебаний может возникнуть при использовании полупроводниковых свечей во всех ситуациях, способствующих увеличению длительности подготовительной стадии разрядов.

В статье решается задача разработки математической модели разрядных процессов в низковольтных емкостных системах зажигания в аварийном режиме релаксационных колебаний на основе общего метода анализа устойчивости автоколебаний в электрических цепях с целью получения условия предотвращения данного режима.

Как известно, для возникновения автоколебаний необходимы два накопителя энергии в виде катушки индуктивности и конденсатора, либо один накопитель энергии и нелинейный элемент с вольтамперной характеристикой, имеющей возрастающие и падающие участки [5]. Подобную вольтамперную характеристику может иметь, как будет показано ниже, совокупность двух

элементов – коммутирующего разрядника и полупроводниковой свечи в режиме малых токов при допущении о линейности свечи. Такие вольтамперные характеристики имеют полупроводниковые свечи в течение подготовительной стадии разрядов при воздействии на них топливовоздушной смеси [3].

Схема замещения зарядно-разрядной цепи низковольтной емкостной системы зажигания представлена на рис. 4. На рисунке обозначено:  $E$  – ЭДС преобразователя напряжения;  $r$  – сумма внутреннего сопротивления преобразователя и сопротивления цепи заряда;  $C$  – емкость накопительного конденсатора;  $P$  – разрядник (нелинейный элемент);  $L$  – индуктивность разрядной цепи;  $R$  – эквивалентное активное сопротивление свечи.

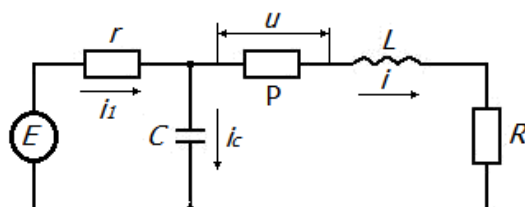


Рис. 4. Схема замещения зарядно-разрядной цепи

Рассмотрим механизм автоколебаний, возникающих при наличии накопителя энергии – конденсатора и нелинейного элемента, имеющего возрастающие и падающие участки.

На рисунке 5 показаны вольтамперные характеристики разрядника 1, эквивалентного активного сопротивления свечи 2, суммарная вольтамперная характеристика разрядника и активного сопротивления свечи 3 и прямая  $U_C = E - r \cdot i$  (4). Как следует из рис.5, суммарная вольтамперная характеристика разрядника и свечи имеет  $N$ -образный вид, т.е. имеет два возрастающих и один падающий участки, причем точка пересечения кривой 3 и прямой 4 является точкой равновесия, где токи и напряжения не меняются.

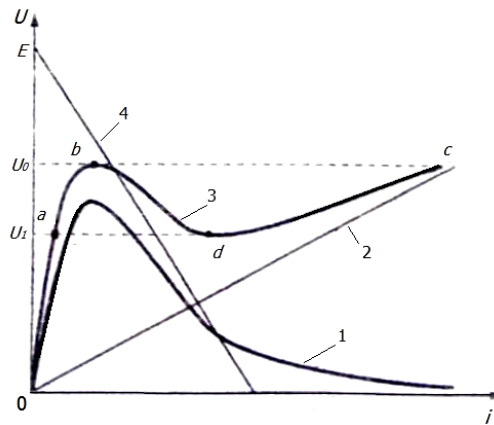


Рис. 5. Вольтамперные характеристики

Возникновение релаксационных колебаний объясняется следующим образом. Если точка пересечения прямой  $U_C = E - r \cdot i$  с суммарной характеристикой разрядника и активного сопротивления свечи является точкой неустойчивого равновесия, то процессы протекают в цепи в приведенной ниже последовательности.

При достижении на накопительном конденсаторе напряжения  $U_0$ , достаточного для пробоя разрядника, разрядник пробивается (точка  $b$  на рис. 5). Ток в цепи резко возрастает, и происходит скачкообразный переход состояния цепи из точки  $b$  в точку  $c$  суммарной вольт-амперной характеристики разрядника и сопротивления свечи. С этого момента ток в разрядной цепи поддерживается за счет разряда конденсатора. Напряжение на конденсаторе уменьшается. При достижении на конденсаторе значения напряжения  $U_1$  (точка  $d$ ) происходит скачкообразный переход состояния цепи из точки  $d$  в точку  $a$ . Далее происходит заряд конденсатора до напряжения  $U_0$  и разрядник вновь пробивается. Описанный процесс повторяется циклически.

Таким образом, для возникновения релаксационных колебаний необходимы два основных условия:

- точка пересечения прямой  $U_C = E - r \cdot i$  с суммарной вольт-амперной характеристикой разрядника и свечи должна быть точкой неустойчивого равновесия.
- суммарная вольт-амперная характеристика разрядника и свечи должны иметь  $N$ -образный вид, т.е. иметь падающие и возрастающие участки.

Запишем систему дифференциальных уравнений для схемы замещения на рис.4.

$$\begin{cases} i_1 = i + i_C; & (1) \\ E = i_1 r + U + iR + L \frac{di}{dt}; & (2) \\ U_C + U + iR + L \frac{di}{dt} = 0. & (3) \end{cases}$$

где  $U$  – напряжение на разряднике.

Исключим из данных уравнений величины  $i_C$  и  $i_1$ .

Подставим (1) в (2):

$$E = ir + i_C r + U + iR + L \frac{di}{dt}. \quad (4)$$

Для тока  $i_C$  в (4) с учетом уравнения (3) справедливо:

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt} = -C \frac{dU}{dt} - CR \frac{di}{dt} + CL \frac{d^2 i}{dt^2}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), после преобразований получим:

$$E = CLr \frac{d^2 i}{dt^2} + (L - CRr) \frac{di}{dt} + i(r + R) + U - Cr \frac{dU}{dt}. \quad (6)$$

При равновесии, т.е. в точке на рис. 5, получаемой при пересечении прямой  $U_C = E - ri$  с суммарной вольт-амперной характеристикой разрядника и активного сопротивления свечи (характеристика 3) получим:

$$i = i_p = \text{const}; U = U_p = \text{const}; \frac{di}{dt} = 0; \frac{dU}{dt} = 0, \quad (7)$$

где  $i_p$  и  $U_p$  – разрядный ток и напряжение на разряднике при равновесии.

В соответствии с (7) уравнение (6) при равновесии примет вид:

$$E = (r + R)i_p + U_p. \quad (8)$$

Известно, что равновесие может быть устойчивым или неустойчивым. Для оценки точка равновесия на рис. 5 используем следующую стандартную логику дальнейшего анализа: дадим разрядному току при равновесии приращение и получим решение для приращения тока; вид этого решения позволит определить, каково равновесие – устойчивое или неустойчивое

Пусть ток  $i$  получит приращение  $\gamma$ :

$$i = i_p + \gamma. \quad (9)$$

Так как  $U = f(i)$ , то разлагая  $U = f(i_p + \gamma)$  по степеням  $\gamma$  и ограничиваясь первыми двумя членами, получим:

$$U = U_p + r_d \cdot \gamma. \quad (10)$$

где  $r_d = dU/di$  при  $i = i_p$  представляет собой динамическое сопротивление разрядника в точке равновесия.

Учитывая, что  $di/dt = d\gamma/dt$  и подставляя (9) и (10) в уравнение (6), получим:

$$E = -CLr \frac{d^2\gamma}{dt^2} + (L - CRr) \frac{d\gamma}{dt} + i_p(r + R) + \gamma(r + R) + U_p + r_d\gamma - Crr_d \frac{d\gamma}{dt}. \quad (11)$$

Вычитая из (11) уравнение электрического равновесия (8), получим уравнение для приращения тока  $\gamma$ :

$$0 = CLr \frac{d^2\gamma}{dt^2} + (Crr_d + Crr_d - L) \frac{d\gamma}{dt} + (r + R + r_d)\gamma. \quad (12)$$

Запишем уравнение (12) в виде:

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} + 2\delta \frac{d\gamma}{dt} + \omega_0^2 \gamma = 0, \quad (13)$$

где  $2\delta = \frac{Crr_d + Crr_d - L}{CLr}$ ,  $\omega_0^2 = -\frac{r + R + r_d}{CLr}$ .

Корни характеристического уравнения:

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{(\delta^2 - \omega_0^2)}. \quad (14)$$

Вывод о возможности установления режима релаксационных колебаний в низковольтных ёмкостных системах зажигания, схема замещения зарядно-разрядных цепей которых показана на рис. 4, на основе анализа полученных корней характеристического уравнения базируется на известном положении теории колебаний: наличие положительной действительной части корней свидетельствует о неустойчивости электрического равновесия в цепи [5], вследствие чего возможен режим колебаний.

Таким образом, режим колебаний возможен, если  $\delta < 0$ , т.е.:



$$CRr + Crr_{\text{д}} - L < 0. \quad (15)$$

Отсюда следует, что для исключения возможности наступления режима релаксационных колебаний должно быть условие, противоположное условию (15), т.е.:

$$L < CRr + Crr_{\text{д}}. \quad (16)$$

При проектировании низковольтных емкостных систем зажигания выбор параметров, удовлетворяющих условию (16), должен обеспечивать сведение к минимуму вероятности возникновения аварийного режима релаксационных колебаний.

Данное утверждение подтверждается опытом эксплуатации систем зажигания. Следует отметить, что поскольку возникновение режима релаксационных колебаний связано с увеличением длительности подготовительной стадии разряда в полупроводниковых свечах, радикальным способом полного исключения подобных аварийных режимов является применение высоковольтных емкостных систем зажигания, обязательным элементом которых являются активизаторы – совокупность импульсных трансформаторов с дополнительными конденсаторами; в этом случае длительность подготовительной стадии разрядов в свечах практически равна нулю.

Наиболее неопределенной величиной в условии предотвращения аварийного режима релаксационных колебаний (16) является динамическое сопротивление разрядника в точке равновесия  $r_{\text{д}}$ . Очевидно, что величина  $r_{\text{д}}$  после пробоя разрядника вблизи точки  $b$  на рис. 5 существенно меньше активного сопротивления свечи  $R$  в режиме малых токов при развитии подготовительной стадии разрядов в полупроводниковой свече. На основании этого для приближенной оценки вероятности исключения режима релаксационных колебаний условие (16) с определенной погрешностью можно представить в упрощенном виде:

$$L < CRr. \quad (17)$$

Известно, что основными показателями эффективности емкостных систем зажигания являются надежность работы, энергетическая эффективность и воспламеняющая способность. Если с точки зрения обеспечения требуемого уровня надежности, исключения аварийных режимов работы в соответствии с условием (16) необходимо уменьшать величину индуктивности разрядной цепи, то влияние индуктивности на энергетическую эффективность разрядных цепей и воспламеняющую способность полупроводниковых свечей не является однозначным [6]. В ряде научных работ показано, что увеличение индуктивности разрядной цепи при определенных условиях повышает энергию искровых разрядов в свечах и увеличивает воспламеняющую способность, оцениваемую, например, по площади пусковой характеристики пусковых воспламенителей камер сгорания газотурбинных двигателей [7]. В подобных ситуациях при проектировании емкостных систем зажигания возникают задачи оптимизации величины индуктивности разрядных цепей по критериям эффективности и надежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половко, А.М. Основы теории надежности: учебник для вузов / А.М. Половко, С.В. Гуров; СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 702 с.
2. Котенко, П.С. Перспективы совершенствования электрооборудования, общие вопросы эксплуатации и ремонта: учебное пособие / П.С. Котенко, Ф.А. Гизатуллин; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Уфа: РИК УГАТУ, 2018. – 295 с.
3. Гизатуллин, Ф.А. Системы зажигания двигателей: учебное пособие / Ф.А. Гизатуллин; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, Уфа, 1998. – 115 с.
4. Вахитов, Р.Ш. Разрядные процессы в системе зажигания с полупроводниковой свечой при запуске ГТД // Р.Ш. Вахитов, Ф.А. Гизатуллин, Г.В. Комиссаров // Авиационная промышленность. – 1979. – №9 – С. 24-25.
5. Капранов, М.В. Теория колебаний в радиотехнике / М.В. Капранов, В.Н. Кулешов, Г.М. Уткин; Изд. «Наука», 1984. – 320 с.
6. Гизатуллин, Ф.А. Закономерности разрядных процессов в емкостных системах зажигания апериодического и колебательного разрядов со стреляющими полупроводниковыми свечами / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов, А.В. Лобанов, В.А. Чигвинцев, Т.М. Ищейкина // Вестник УГАТУ – 2013. – Т.17, №1(54) – С.135-140.
7. Гизатуллин, Ф.А. Емкостные системы зажигания / Ф.А. Гизатуллин; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, Уфа. – 2002. – 249 с.

*Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛЯТОРОВ В СОСТАВЕ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Аннотация:* Решается задача расчетного определения величины индуктивности разрядной цепи осциллятора в составе плазменных систем зажигания авиационных газотурбинных двигателей для обеспечения надежного повторного зажигания электрической дуги в плазмотроне при рассогласовании внешней характеристики источника питания и вольтамперной характеристики дуги без увеличения потребляемой осциллятором мощности.

*Ключевые слова:* плазменная система зажигания, разрядные процессы, электрическая дуга, осциллятор, плазмотрон.

Современные системы зажигания, в том числе емкостные, плазменные, имеют ограничения по высотности запуска авиационных газотурбинных двигателей. Проблема высотности запусков имеет много аспектов, в том числе обеспечение устойчивости искрообразования или дугообразования в свечах зажигания, обеспечение надежного воспламенения топливовоздушной смеси в камерах сгорания двигателей, стабилизация пламени при изменении положения границы циркуляционной зоны в камерах сгорания с подъемом на высоту.

С точки зрения обеспечения надежных высотных запусков ГТД наиболее перспективными считаются плазменные системы зажигания, которые менее критичны к месту установки свечи в камере сгорания по сравнению с традиционными емкостными системами, так как плазменная дуга обладает большей площадью контакта с горючей смесью.

В плазменных системах зажигания со свечами с воздушным искровым зазором, в отличие от емкостных систем зажигания с полупроводниковыми свечами, образование дугового разряда критично к параметрам среды, для надежного запуска двигателя в напряженных условиях полета, например, на больших высотах или при высоких скоростях, необходимым условием является образование в плазменной свече устойчивого дугового разряда.

Обязательным элементом любой плазменной системы зажигания является осциллятор – устройство, формирующее высоковольтные импульсы для

инициирования электрической дуги в свече-плазмотроне. Как правило, осцилляторы работают по принципу импульсных систем зажигания, в котором энергия накапливается в электрическом поле накопительных конденсаторов или в магнитном поле катушки индуктивности. Накопленная энергия преобразуется в высоковольтные импульсы малой длительности, инициирующие зажигание дуги в плазмотроне [1].

Известно, что для обеспечения устойчивости электрической дуги в плазмотроне при изменении газодинамических параметров в камере сгорания ГТД, приводящих к изменению положения вольтамперной характеристики электрической дуги по отношению внешней характеристике источника питания, необходима токовая стабилизация. Стабилизация тока в плазменной системе зажигания достигается различными способами, в том числе за счет увеличения напряжения холостого хода силового трансформатора, применения высокочастотных инверторных источников питания с резонансными контурами.

В критических условиях при нарушении устойчивости горения дугового разряда происходит гашение дуги, ток через дугу падает до нуля. Дуговым промежутком в плазмотроне деионизируется, электрическая прочность междуэлектродного промежутка восстанавливается. Возможна ситуация, когда повторное образование дуги под действием ионизирующих импульсов осциллятора может не произойти. Очевидно, что действие осциллятора будет эффективным в том случае, когда при нарушении устойчивости дугового разряда ионизирующий импульс осциллятора возникает в промежутке времени гашения дуги, когда еще не происходит полной деионизации дугового промежутка.

В работе [2] решалась задача определения режима работы осциллятора в составе плазменных систем зажигания для обеспечения устойчивости горения дуги в плазмотроне. Задача сводилась к определению выходной мощности осциллятора для возникновения инициирующего высоковольтного импульса в промежутке времени гашения дуги при рассогласовании внешней характеристики источника питания и вольтамперной характеристики дуги.

На основании уравнения для переходного тока при гашении дуги определено время гашения дугового разряда в плазмотроне:

$$t_1 = \frac{L}{R} \ln \frac{U_{arc}}{U_{arc} - U_0}, \quad (1)$$

где  $U_{arc}$  – напряжение в дуге в функции длины дуги, тока в критическом режиме гашения дуги, скорости плазмообразующего воздуха в плазмотроне при заданном давлении воздуха на входе в камеру сгорания двигателя;

$U_C$  – напряжение на выходе источника питания плазмотрона;

$L$  – индуктивность силовой цепи плазменной системы зажигания;

$R$  – активное сопротивление силовой цепи.

Для определения предельного режима работы осциллятора в составе плазменной системы зажигания для обеспечения повторного зажигания дугового разряда после возможного при запуске ГТД в высотных условиях нарушения устойчивости дугового разряда использовано условие:

$$T \leq t_1, \quad (2)$$

где  $T$  – период следования высоковольтных импульсов осциллятора.

Для требуемой мощности осциллятора получено [2]:

$$P \geq \frac{CU_1^2 R}{2\eta L \ln \frac{U_{arc}}{U_{arc} - U_0}}, \quad (3)$$

где  $C$  – емкость накопительного конденсатора в составе осциллятора;

$U_1$  – напряжение пробоя разрядника осциллятора;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий потери в зарядной и разрядной цепях осциллятора.

Предлагаемый в [2] подход к определению режима работы осциллятора с учетом времени гашения дуги в напряженных условиях работы камер сгорания при высотном запуске ГТД может привести к завышенным значениям потребляемой осциллятором мощности, которая будет избыточной при наземном запуске двигателя, когда устойчивость дуговых процессов является

высокой, при этом повышение мощности неизбежно связано с увеличением массы и габаритов системы зажигания.

В статье решается задача определения требуемых параметров осциллятора без превышения потребляемой мощности, а, следовательно, без существенного увеличения массы и габаритов плазменной системы зажигания в целом.

Предлагаемое решение основано на изменении соотношения между длительностью высоковольтных импульсов осциллятора и периодом следования импульсов, т.е. скважности импульсов при сохранении уровня потребляемой мощности.

Принципиальная схема осциллятора емкостного типа в составе плазменной системы зажигания показана на рис. 1.

Найдем выражение для длительности разряда конденсатора  $C$  через пробитый разрядник  $FV$ , первичную обмотку  $W_1$  импульсного трансформатора  $T$  при допущении о линейности разрядной цепи. Данное допущение обосновывается тем, что активное сопротивление нелинейного элемента – разрядника  $FV$  на порядок меньше эквивалентного активного сопротивления разрядной цепи [3].

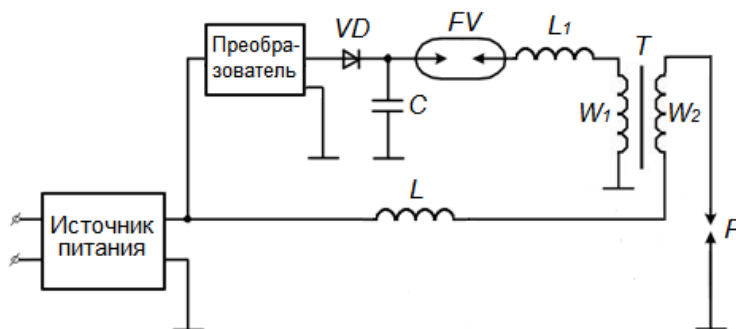


Рис. 1. Принципиальная схема осциллятора емкостного типа в составе плазменной системы зажигания

Для разряда конденсатора на линейную цепь  $R-L$  справедливо [4]:

$$U_C(t) = U_1 \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

где  $U_1$  – напряжение пробоя разрядника;

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}, \delta = \frac{R_1}{2L_1};$$

$L_1$  – индуктивность разрядной цепи;

$R_1$  – эквивалентное активное сопротивление разрядной цепи;

$$\varphi = \arctg\left(-\frac{\omega}{\delta}\right).$$

При значительной индуктивности разрядной цепи  $L_1$  осциллятора можно считать, что

$$\omega \approx \omega_0, \varphi = \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Примем, что минимально достаточный уровень выходного напряжения осциллятора на вторичной обмотке  $W_2$  соответствует напряжению на накопительном конденсаторе  $U_2 \ll U_1$  при очередном переходе тока разряда конденсатора через нуль в момент времени  $t_2$ .

Тогда в соответствии с (4) имеем:

$$U_2 = U_1 e^{-\delta t_2} \sin\left(\omega t_2 - \frac{\pi}{2}\right). \quad (6)$$

При переходе тока через нуль

$$\omega t_2 \approx n\pi, \quad (7)$$

где  $n$  – число полуволн тока разряда конденсатора.

Поэтому

$$\sin\left(\omega t_2 - \frac{\pi}{2}\right) = \sin\frac{(2n-1)\pi}{2} = \pm 1. \quad (8)$$

В соответствии с (8) выражение (6) примет вид:

$$U_2 = \pm U_1 e^{-\delta t_2}. \quad (9)$$

Решая (9) относительно  $t_2$ , получим:

$$t_2 = \frac{2L_1}{R_1} \ln \frac{U_1}{U_2}. \quad (10)$$

Для возникновения инициирующего высоковольтного импульса в промежутке времен гашения дуги в плазмотроне  $F$  (рис. 1) при рассогласовании внешней характеристики источника питания и вольтамперной характеристики дуги с учетом выражения (10) для критического времени разряда конденсатора  $t_2$  примем следующее условие:

$$t_2 \geq t_1,$$

где  $t_1$  определяется выражением (1).

Таким образом,

$$\frac{2L_1}{R_1} \ln \frac{U_1}{U_2} \geq \frac{L}{R} \ln \frac{U_{arc}}{U_{arc} - U_0}. \quad (11)$$

Соотношение (11) дает возможность на основании известных параметров силовой цепи плазменной системы зажигания, плазмотрона и разрядной цепи осциллятора определять требуемую величину индуктивности разрядной цепи  $L_1$  осциллятора для обеспечения гарантированного повторного образования электрической дуги в плазмотроне.

Наиболее неопределенной величиной в (11) является падение напряжения в электрической дуге  $U_{arc}$ . Конкретизируем величину  $U_{arc}$  с учетом результатов работ [2, 5, 6, 7].

Примем, что падение напряжения в дуговом разряде состоит из двух составляющих падения напряжения  $U_{arc}'$  при нулевой скорости плазмообразующего воздуха и приращения падения напряжения  $\Delta U$  за счет обдува дуги плазмообразующим воздухом, т.е.  $U_{arc} = U_{arc}' + \Delta U$ .

В [5] приводится следующее выражение для падения напряжения в электрической дуге при давлениях выше атмосферного и скорости обдува воздухом, равной нулю:

$$U_{arc}' = \frac{Cl}{I^a} P^b, \quad (12)$$

где  $C = 80$ ;

$$a = 0,5 \div 0,6;$$

$b = 0,3$ , причем величина  $b$  сохраняется постоянной при изменении давлений в пределах 98-98000 кПа;

$l$  – длина дуги;

$I$  – ток через дугу.

Анализ работы [6] показал, что давление воздуха на входе в камеру сгорания зависит от режима запуска ГТД. При наземном запуске давление в среднем может меняться в пределах 980-4050 кПа; при высотном запуске на



режиме авторотации – в пределах 15-400 кПа; при высотном встречном запуске – 120-4050 кПа. Приведенные данные свидетельствуют о том, что только при высотном запуске ГТД на режиме авторотации давление воздуха на входе в камеру сгорания может быть ниже атмосферного, следовательно, формула (12) пригодна для использования с небольшими ограничениями при анализе устойчивости электродуговых процессов в плазменных системах зажигания.

Для учета влияния скорости потока плазмообразующего воздуха на приращение падения напряжения  $\Delta U$  используем результаты работы (7), в которой экспериментально получена зависимость падения напряжения от скорости обдува дуги воздухом.

Аппроксимируем экспериментально данные, приведенные в [7], зависимостью:

$$\Delta U = AV, \quad (13)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент равный 7,33 В\*с/м;

$V$  – скорость потока плазмообразующего воздуха, м/с.

Таким образом, с учетом (12), для полного падения напряжения в дуговом разряде будем иметь:

$$U_{arc} = \frac{Cl}{I^a} P^b + AV. \quad (14)$$

В формулу (14) входят два параметра электрической дуги – длина дуги  $l$  и ток через дугу  $I$ . Длина дуги в серийных плазменных свечах в зависимости от условий в камере сгорания может меняться в пределах от одного до нескольких сантиметров, ток через плазменную свечу от единиц до десяти Ампер. С учетом этих диапазонов изменения длины дуги и тока падение напряжения в плазменной свече без учета скорости воздушного потока  $V$  составляет от 6 до 40 Вольт, что соответствует реальным экспериментальным данным применительно к серийным плазменным системам зажигания с потребляемой мощностью порядка одного киловатта.

Для критического режима, т.е. минимально устойчивого горения дуги на основании (14) запишем:

$$U_{arc} = \frac{Cl}{I_{кр}^a} P^b + AV_{max}, \quad (15)$$

где  $I_{кр}$  – ток, соответствующий критическому режиму;

$V_{max}$  – максимально допустимая скорость плазмообразующего воздуха.

Подставив (15) в (11), определим требуемую величину индуктивности разрядной цепи осциллятора:

$$L_1 \geq \frac{R_1 L}{R} \cdot \frac{\ln \frac{\frac{Cl}{I_{кр}^a} P^b + AV_{max}}{\frac{Cl}{I_{кр}^a} P^b + AV_{max} - U_0}}{2 \ln \frac{U_1}{U_2}}. \quad (16)$$

Таким образом, в статье решена задача расчетного определения величины индуктивности разрядной цепи осциллятора в составе плазменной системы зажигания для обеспечения гарантированного повторного зажигания электрической дуги в плазмотроне при рассогласовании внешней характеристики источника питания и вольтамперной характеристики дуги без превышения потребляемой осциллятором мощности, т.е. без увеличения массы и габаритов осциллятора. Полученное решение совместно с результатами работы [2] позволяет выбирать оптимальные параметры осцилляторов для обеспечения и поддержания устойчивости электродуговых процессов в плазменных системах зажигания авиационных газотурбинных двигателей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский, Г.Ф. Плазменные системы газоперекачивающих агрегатов / Г.Ф. Романовский, И.Б. Матеев, С.И. Сербин; СПб.: Недра, 1992. – 142 с.
2. Гизатуллин, Ф.А. К определению режима работы осциллятора в составе плазменной системы зажигания / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т.14, №2 (37). – С.87-89.
3. Котенко, П.С. Перспективы совершенствования электрооборудования летательных аппаратов, общие вопросы эксплуатации и ремонта: учебное пособие / П.С. Котенко, Ф.А. Гизатуллин; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Уфа: РИК УГАТУ, 2018. – 295 с.
4. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехник / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян; М.; Л.: Энергия, 1981, т.1 – 522 с.
5. Буль, Б.К. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль; под ред. Г.В. Буткевича. Уч. пособие для вузов – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.

6. Онищик И.И., Христофоров И.Л. Организация рабочего процесса и выбор параметров камер сгорания ТРД / И.И. Онищик, И.Л. Христофоров. – М.: МЭИ. – 1982. – 586 с.
7. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда: учебное руководство для вузов / Ю.П. Райзер: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат. лит., 1992. – 536 с.

*Хайретдинов Р. И., Даутов Д. Ш., Вульфин А. М. Миронов К. В., Фрид А. И.*  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## **СИСТЕМА ЗАЩИЩЕННОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ В ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СЕТЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

*Аннотация:* Разработаны и реализованы инструменты защиты управляющего трафика программно-определяемых сетей. Предложен способ, основанный на внедрении в заголовок пакета зашифрованной метки, позволяющей выделять вредоносный трафик между узлами SDN. Продемонстрирована возможность обнаруживать пакеты, отправленные контроллеру SDN злоумышленником. Эффективность противодействия DoS-атакам возросла в 7,8 раз.

*Ключевые слова:* SDN, информационная безопасность, OpenFlow, DoS-атаки, RAW-сокеты.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Все большую актуальность приобретает проблема эффективного управления, обеспечения возможности горизонтального масштабирования сетевой инфраструктуры и автоматизации конфигурирования сетевого оборудования в корпоративных и промышленных сетях [1–2].

Технология программно-определяемых сетей (SDN) позволяет повысить эффективность управления и обеспечить требуемый уровень масштабируемости решений за счет отделения функций передачи трафика от функций управления [3], которые вынесены в контроллеры, что упрощает и удешевляет коммутационное оборудование [4]. Контроллер SDN управляет коммутационным оборудованием всей сети [5]. Используя API контроллера, различные приложения и сервисы, находящиеся на уровне приложений, могут использовать ресурсы сети и изменять ее конфигурацию для своих нужд [6]. Взаимодействие контроллера с оборудованием сети происходит по протоколу OpenFlow.

В связи со спецификой SDN, особенно актуальными являются вопросы обеспечения требуемого уровня защищенности подобных сетей от внутренних и внешних угроз нарушения информационной и кибербезопасности.

Таким образом, целью работы является повышение защищенности передачи данных управления по протоколу OpenFlow в SDN за счет применения отечественных алгоритмов шифрования.

## 2. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ЗАЩИЩЕННОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ В ПРОМЫШЛЕННОЙ SDN

Для обеспечения защиты OpenFlow управляющего трафика сети ключевыми являются обеспечение доступности и целостности данных. Предлагается использовать метод внедрения в заголовок IP-пакета зашифрованной метки, являющейся зашифрованной хэш-суммой содержимого пакета. При принятии пакета, первым делом проверяется корректность данной метки. В случае успешной проверки пакет идет на дальнейшую обработку, либо просто отбрасывается. Так как время данной проверки относительно мало, это позволяет избежать негативных последствий DoS-атак [7–9].

Для шифрования меток предлагается использоваться симметричный шифр – отечественный алгоритм блочного шифрования ГОСТ 34.12-2018, также известный как «Кузнечик» [10–12].

Для внедрения метки предлагаем использовать IP-заголовок. Будем исходить из того, что пакеты с OpenFlow-трафиком не фрагментируются и выберем двухбайтовое поле «Идентификатор» для размещения в нем зашифрованной метки, что гарантирует правильность обработки пакета.

Итоговый алгоритм защиты управляющего трафика SDN включает следующие шаги: 1) обнуление поля идентификатора и контрольной суммы в заголовке пакета; 2) расчет хэш-суммы тела пакета при помощи алгоритма ГОСТ 34.11-2018; 3) шифрование хэш-суммы при помощи ГОСТ 34.12-2018; 4) получившаяся метка помещается в поле «Идентификатор» IP-пакета.

Алгоритм для проверки корректности метки принимающей стороной будет схожим, нужно лишь заново вычислить метку и сравнить с изначальной. В случае совпадения метка является корректной, а значит можно приступать к обработке пакета и последующей отправке ответа адресату.

## 2. РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАЩИЩЕННОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ В SDN

Моделирование SDN и реализацию системы защищенного обмена данными будем производить в локальной сети между четырьмя виртуальными машинами (рис. 1).

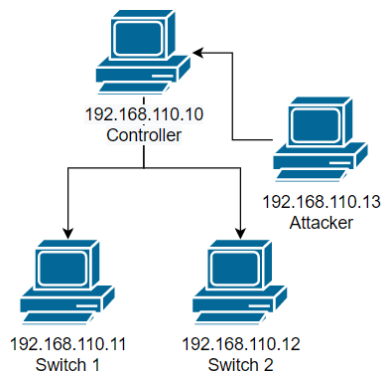


Рис. 1. Схема моделируемой SDN

Рассмотрим сценарии реализации сетевых атак для данного сегмента промышленной сети (атака IP-spoofing, атака DoS). Согласно сформированной статистике, средняя задержка ответа контроллера составляет 663 мс, что в 17 раз больше, чем без DoS-атаки. При этом нагрузка процессора находится на отметке 95% вместо 15%.

Внедрим систему защищенного обмена данными в нашу сеть и проведем те же атаки. При получении пакета от коммутатора проверка метки на корректность была успешно пройдена, после чего контроллер приступил к обработке пакета и формированию ответа коммутатору. При получении же пакета от злоумышленника контроллер отбрасывает пакет сразу после того, как становится понятно, что метка неправильная.

Составим график зависимости задержки ответа контроллера от частоты отправки пакетов злоумышленником до и после внедрения системы защиты (рис. 2). Как видно на графике (рис. 2, а), резкий рост времени задержки начинается при 110 пакетах в секунду, а появление потерь начинается при 120 пакетах в секунду, отправляемых злоумышленником. При этом, после внедрения системы защиты в тех же условиях ни задержек, ни потерь нет.

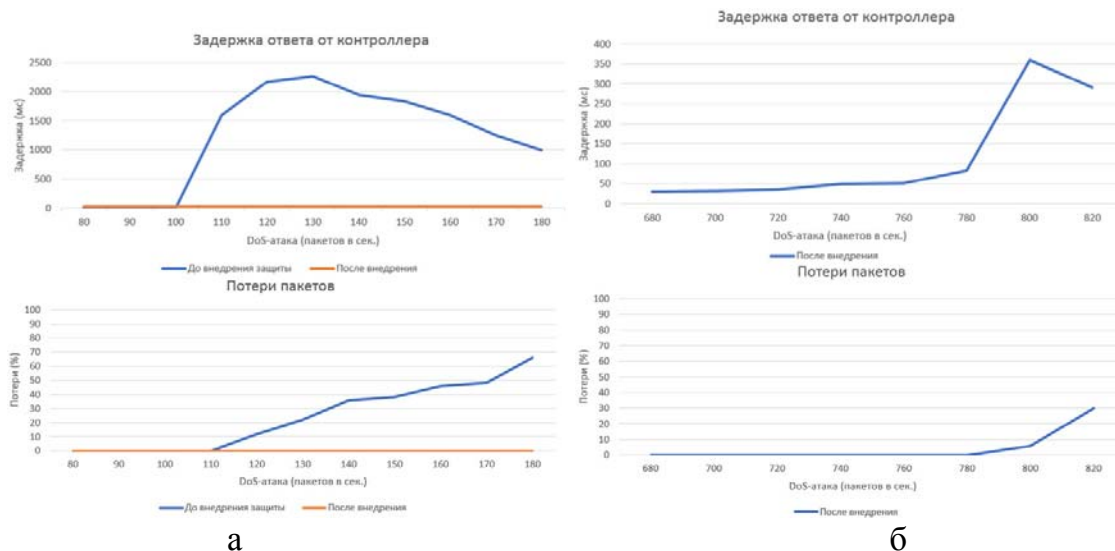


Рис. 2. График зависимостей задержки и потерь от DoS-атаки (а) до и после внедрения защиты и (б) только после внедрения защиты

Применение данной системы также повлияло и на работу в сети в условиях DoS-атаки. После внедрения системы защиты потери и задержка пакетов остаются в пределах нормы даже при 780 отправляемых пакетах в секунду (рис. 2, б). Рост задержки и появление потерь начинаются при 800 получаемых пакетах в секунду. Таким образом, в условиях DoS-атаки сеть стала работать примерно в 7,8 раз эффективнее после внедрения в нее системы защищенного обмена трафиком.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение системы защищенного обмена данными позволило практически полностью устранить вероятность реализации наиболее актуальных угроз для SDN.

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода и внедрение в реальную SDN имеет, по всей видимости, два пути:

- Создание программно-аппаратного модуля, который мог бы внедрять и проверять метку в проходящем через него трафике. Как результат, весь OpenFlow-трафик будет защищен.

- Изменение исходного кода ПО коммутаторов и контроллера на уровне драйверов и прошивок. Это позволило бы добиться меньшей

производительности решения, но и с меньшими затратами на глубокую модернизацию и переоснащение сети. К сожалению, большая часть сетевого оборудования на данный момент является продуктами зарубежных компаний, а значит наиболее перспективным является первый вариант повышения защищенности SDN промышленных объектов энергетического комплекса.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00668.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmad S., Mir A. H. Scalability, consistency, reliability and security in sdn controllers: A survey of diverse sdn controllers // Journal of Network and Systems Management. – 2021. – Т. 29. – №. 1. – С. 1–59.
2. Parulkar G. SDN fundamentals: motivation, architecture, and benefits // CSI Transactions on ICT. – 2020. – Т. 8. – №. 1. – С. 7–9.
3. Feamster N., Rexford J., Zegura E. The road to SDN: an intellectual history of programmable networks //ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2014. – Т. 44. – №. 2. – С. 87–98.
4. Zhu S. Y. et al. Guide to Security in SDN and NFV: Challenges, Opportunities, and Applications. – Springer, 2017. – 331 p.
5. Kim D. et al. Integrated SDN and non-SDN network management approaches for future internet environment //Multimedia and Ubiquitous Engineering. – Springer, Dordrecht, 2013. – С. 529–536.
6. Shalimov A. et al. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers // Proceedings of the 9th central & eastern European software engineering conference in Russia. – 2013. – С. 1–6.
7. Krishnan P., Najeem J. S., Achuthan K. SDN framework for securing IoT networks // International Conference on Ubiquitous Communications and Network Computing. – Springer, Cham, 2017. – С. 116–129.
8. Paul S., Kumar R. SDN: the network of the future // CSI Transactions on ICT. – 2020. – Т. 8. – С. 29–32.
9. Yan Q., Huang W. A DDoS detection and mitigation system framework based on spark and SDN // International Conference on Smart Computing and Communication. – Springer, Cham, 2016. – С. 350–358.
10. Zhou R. et al. Analysis of SDN Attack and Defense Strategy Based on Zero-Sum Game // International Conference on Brain Inspired Cognitive Systems. – Springer, Cham, 2019. – С. 479–485.
11. Zhang L. et al. A SDN Proactive Defense Scheme Based on IP and MAC Address Mutation //International Wireless Internet Conference. – Springer, Cham, 2016. – С. 51–60.
12. Dolmatov V. GOST R 34.12-2015: Block cipher “Kuznyechik” // Transformation. – 2016. – Т. 50. – С. 10.

*Ямалов И. И., Шарафутдинов Ш. Н., Левченко Л. И., Султанов А. М.,  
Уразбахтин Р. Р.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

*Аннотация:* В данной статье рассмотрена методика обеспечения электромагнитной совместимости технических средств. Описаны способы защиты аппаратуры от помех.

*Ключевые слова:* помехозащищенность, технические средства, экранирование, электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи.

Для надежной работы электронного оборудования при различных технологических и эксплуатационных условиях требуется корректная передача сигналов между его компонентами. Передача сигнала подвержена воздействиям различных источников. Эффект возмущения окружающей среды может проявляться в нежелательных помехах, резонансных и переходных явлениях, которые могут вызвать неправильную работу электронного оборудования, искажение и ухудшение передачи данных и их записи, а в крайних случаях также поломку технического средства. При этом абсолютно надежная, но несовместимая с электромагнитной обстановкой система не имеет практического применения. Оборудование должно работать в электромагнитной среде без нарушения значений, установленных техническими стандартами и рекомендациями.

Тенденция к увеличению числа технических электронных средств, работающих в ограниченном пространстве, приводит к повышению их плотности. Рост их производительности зачастую обеспечивается увеличением верхней частоты спектра рабочих сигналов. Совокупность этих факторов может вести к нарушению функционирования оборудования из-за взаимных электромагнитных помех (ЭМП), вследствие чего встает вопрос об организации мероприятий по обеспечению их совместимости.

Электромагнитной совместимостью (ЭМС) называют способность технического средства сохранять свои качественные характеристики при



оказании на него электромагнитного воздействия в заданной электромагнитной обстановке [1].

У ЭМС есть три составляющие: генерация, передача и приём электромагнитной энергии. Источник генерирует эмиссию, энергия передается к приемнику, где обрабатывается. Результатом может быть желательное или нежелательное поведение приемника. Помеха возникает, когда принятая энергия приводит к нежелательному поведению. Таким образом, непреднамеренная передача или приём электромагнитной энергии вредны не во всех случаях ее появления: помеху создаёт нежелательное поведение приёмника. По этой причине, от результатов обработки принятой энергии в приёмнике, зависит конечный результат в виде появления или предотвращения помехи.

Все электронное оборудование способно создавать электромагнитные помехи, а также, каждое такое изделие принимает их. По этой причине при разработке и производстве данных изделий следует руководствоваться следующими принципами:

- уровень помех, который может генерировать блок электроники, не должен превышать требуемый;
- уровень устойчивости блока электроники к ЭМП должен быть достаточным для его корректной работы [2].

Существует четыре критерия оценки качества функционирования технических средств при воздействии помех:

Критерий А – воздействие ЭМП не отражается на рабочих характеристиках устройства, функционирование которого происходит в полном соответствии с техническими условиями или стандартами. Не допускается ухудшение качества функционирования, установленного изготовителем, или прекращение выполнения функций.

Критерий В – допускается кратковременное ухудшение рабочих характеристик устройства во время воздействия помехи. После прекращения

воздействия помехи функционирование полностью восстанавливается без вмешательства обслуживающего персонала.

Критерий С – аналогичен В, однако допускает вмешательство обслуживающего персонала для возобновления работоспособности устройства (перезагрузка системы).

Критерий D – физическое повреждение аппаратуры под действием помехи с нарушением функционирования (выгорание участков плат, разрушение элементов устройства). При этом восстановление работоспособности технического средства возможно только путем ремонта.

По происхождению помехи делятся на 2 вида: искусственные и естественные.

Искусственные помехи возникают в результате деятельности человека и делятся на организованные и неорганизованные. Организованные помехи создаются искусственно для нарушения работоспособности радиоэлектронных средств. Неорганизованные помехи возникают из-за особенностей физического процесса, несовершенства технологических средств и принятых организационных и технических мер.

Естественные помехи возникают не в результате деятельности человека, а из-за различных естественных источников (электромагнитные процессы и явления, которые происходят в различных оболочках Земли и космосе и не связаны с деятельностью человека).

Обеспечение ЭМС основано на изучении электромагнитной обстановки и поиске факторов, влияющих на электромагнитную обстановку при совместном функционировании технического средства с другими элементами системы, а также определение причин возникновения данных факторов и установлении связи между ними.

После нахождения причин возникновения помех, в соответствии с составляющими ЭМС предполагается три способа их предотвращения:

- Подавление эмиссии в источнике.
- Ослабление эффективности канала, по которому передается энергия.

– Снижение восприимчивости приёмника к эмиссии.

В общем случае мероприятия по обеспечению ЭМС направлены на ослабление эмиссии электромагнитных помех и предотвращении возникновения перенапряжений в источниках их возникновения и среде распространения, а также на защиту изделий от подобного влияния. В результате происходит оптимизация параметров электронных технических средств, вносятся изменения в их конструкцию и изменяются технические характеристики.

Для определения направления, в котором разработчику следует двигаться при решении проблемы обеспечения ЭМС, необходимо определить, какому уровню соответствует данная задача [3]:

- обеспечение ЭМС между несколькими системами, функционирующими независимо друг от друга – межсистемная ЭМС;
- обеспечение ЭМС между устройствами, находящимися внутри одной сложной системы – внутрисистемная ЭМС;
- обеспечение ЭМС между внутренними элементами в самом устройстве – внутриаппаратная ЭМС.

Решение данных задач, как правило, сводится к двум методам: организационному и техническому.

Организационный метод относится к обеспечению межсистемной ЭМС. Он заключается в определении оптимальных мест размещения технических средств в пространстве, рациональном выборе частот для радиоканалов, разделении зон или времени работы оборудования.

Технологический метод заключается в прогнозировании помех в узлах блока и расчете устройств помехоподавления. Также для этих целей могут использоваться специальные устройства, предназначенные для компенсации и подавления непреднамеренных помех.

Основными способами помехозащиты на сегодняшний день являются: фильтрация, экранирование, рациональное выполнение монтажа соединений и заземления, оптимизация компоновки элементов и узлов.

Конструкция фильтров электромагнитных помех зависит от особенностей оборудования и может представлять собой как один конденсатор, так и сложное устройство из нескольких конденсаторов и дросселей в одной ячейке. При этом они могут быть установлены как непосредственно у источника помех, так и перед приемником.

Экраном называется проводящая конструкция уменьшающая непреднамеренные помехи на приемник. Он может быть внесен в конструкцию для снижения возмущающего поля до допустимого уровня. Различают два вида экранирования. В первом случае защищаемые компоненты устанавливаются под экраном, а источник помех – вне его. Во втором случае экраном закрывается сам источник помех, а компоненты выносятся за него. Как правило, в качестве экранов применяются оболочки, выполненные из металла. Функции экранов чаще всего выполняют кожухи, панели и крышки приборов, при выборе и расчете толщины которых кроме эффективности экранирования необходимо также учитывать требования механической прочности, жесткости, надежности соединения отдельных элементов, минимума массы [4].

Основными видами монтажных соединений, применяемых в технических средствах, являются: разновидности проводного монтажа, печатный монтаж, монтаж коаксиальными кабелями, проволочный монтаж. Каждый вид монтажного соединения находит применение при создании конструктивных функциональных узлов определенного уровня. Для решения вопросов внутриаппаратной ЭМС необходимо уяснить роль, которую играют электрические соединения в конструкции аппаратуры, и их влияние на такие основные параметры изделия как чувствительность, быстродействие, уровень генерируемых помех и восприимчивость к ним. Степень искажения сигналов зависит от электрических параметров, топологии и геометрической длины соединения. Помехи, возникающие при конструктивной реализации межсистемных соединений, не должны превышать допустимых, а возникающие задержки сигналов должны обеспечивать быстродействие устройства.

С точки зрения ЭМС цепи заземления необходимы для обеспечения проектируемого устройства необходимыми контурами сброса паразитной энергии помех. При разработке системы лучшим вариантом считается изоляция цепей возврата сигнальных токов, цепей возврата постоянных токов питания и цепей возврата переменных токов питания и устройство системы заземления из трех независимых контуров, сходящихся в одной точке. Данный подход даст возможность оптимизировать каждую заземляющую цепь в отдельности [5].

Оптимизация компоновки элементов внутри блока включает в себя анализ исходных данных, предъявляемых к конструкции, предварительное размещение ячеек, анализ ЭМС блока, внесение изменений в конструкцию при необходимости. При расположении элементов внутри блоков следует размещать элементы, имеющие большое количество взаимных связей, в одном месте, а компоненты, чувствительные к помехам, устанавливать отдельно от их источников.

Соблюдение требований по обеспечению ЭМС позволяет повысить качество работы электронного оборудования, защитить его от возможного выхода из строя и оградить техническое средство от влияния электромагнитной обстановки.

На сегодняшний день не существует общей методики по обеспечению ЭМС, подходящей для любого электронного оборудования. Это объясняется большим числом вариантов компоновки, различными техническими характеристиками устройств, множеством материалов, входящих в состав блоков и т.д. Методы обеспечения ЭМС на уровне электро- радиокомпонентов, на уровне печатных плат, на уровне блоков электроники и их размещения в помещении, существенно отличаются. Большинство методик, как правило, опираются на практический опыт устранения помех, однако в настоящее время разработаны средства для моделирования электромагнитной обстановки и тестирования на ЭМС, что позволит решать вопрос обеспечения совместимости быстрее и эффективнее.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р. А. Колесников, В. Д. Зюзин, “Проблема электромагнитной совместимости. электромагнитная обстановка и анализ источников помех для оборудования связи,” Инновации и инвестиции, №10, С. 154-158, 2020.
2. В. К. Кульчицкий, Р. О. Мешалов, В. В. Гончаров “Анализ подходов к обеспечению электромагнитной совместимости,” Транспорт России: проблемы и перспективы, С.220-221, 2019.
3. М. А. Ромащенко, “Основные аспекты современного состояния проблемы обеспечения ЭМС РЭС” Вестник Воронежского государственного технического университета, С.144, 2010.
4. В. В. Евстафьев, “Основы конструирования и технологии производства РЭС,” Академия Естествознания, 92 с., 2016.
5. В. А. Скворцов, “Заземление и экранирование как способы обеспечения электромагнитной совместимости электронных устройств.” Силовая электроника, №02, С. 36-43, 2020.

*Никитина А. Н.<sup>2</sup>, Петров В. С.<sup>1</sup>, Аркадьев Д. Э.<sup>2</sup>, Наумов В. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова

<sup>2</sup>ООО НПП «ЭКРА»

## **РЕЗЕРВНАЯ АЛАР С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА РЕЖИМА**

*Аннотация:* Благодаря простоте своей реализации наибольшее распространение получила резервная функция автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР), контролирующая изменение тока в процессе асинхронного режима (АР). Характерной особенностью тока в АР является колебание его действующего значения от максимума до минимума. Максимального значения ток достигает при угле передачи, близком к  $180^\circ$ , минимального – близком к  $0^\circ$ . Для измерения периода колебаний тока используют моменты последовательного перехода кривой действующего значения тока через верхний и нижний пороги. В режиме синхронных качаний энергосистема сохраняет устойчивость, в связи с чем кривая действующего значения тока имеет затухающий колебательный характер. АЛАР учитывает разницу в характере изменения тока в этих режимах и разграничивает режим синхронных качаний и АР по длительности цикла колебаний. Как известно, длительность цикла синхронных качаний намного превышает критическую длительность цикла при АР.

Известные реализации АЛАР, контролирующие ток и определяющие длительность цикла АР по двум соседним одноименным переходам кривой через порог, имеют общий недостаток, характерно проявляющийся в начале развития АР. Действительно, при длительном процессе потери устойчивости системы кривая тока может перейти через порог задолго до возникновения АР. В этом случае продолжительность первого цикла может превысить уставку по длительности цикла АР, и АЛАР исключит точку перехода кривой тока из рассмотрения. Это приведет к пропуску первого цикла АР и, следовательно, к затягиванию процесса ликвидации асинхронного режима. Последнее чревато увеличением масштабов аварии, развалом всей энергосистемы и последующим длительным ее восстановлением.

В докладе предлагается АЛАР с интеллектуальным контролем изменения параметра режима, цель которого - повышение надежности выявления первого цикла АР. Это достигается благодаря началу отсчета его длительности только после потери устойчивости системы. Интеллектуальный контроль изменения тока позволяет исключить ложное срабатывание АЛАР от колебаний тока в утяжеленном нагрязном режиме.

*Ключевые слова: противоаварийная автоматика, асинхронный режим, автоматика ликвидации асинхронного режима.*

## ВСТУПЛЕНИЕ

Традиционно автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) содержит две функции: основную и резервную 1. Основная функция 2-предназначена для выявления электрического центра качания на контролируемом участке в первом цикле асинхронного режима (АР) и формирования управляющих воздействий, направленных на деление сети. Резервная функция 6 действует на деление сети только по прошествии заданного числа циклов АР. При этом она не учитывает знак скольжения и положение электрического центра качания.

В основе принципа действия резервной функции АЛАР – непрерывный контроль одного из режимных параметров, например, активной мощности, сопротивления, напряжения или тока. Благодаря простоте своей реализации наибольшее распространение получила резервная функция АЛАР, контролирующая изменение тока в процессе АР. Она настроена на выявление характерного признака АР – периодических колебаний действующего значения тока. Для исключения ложного срабатывания в режиме синхронных качаний контролируют длительность цикла АР. Известные реализации **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.** резервной АЛАР имеют принципиальный недостаток, который связан с началом отсчета продолжительности первого цикла еще до потери устойчивости электрической системой. Это ведет к пропуску первого проворота и затягиванию процесса ликвидации АР.

В докладе предлагается резервная АЛАР с интеллектуальным контролем изменения параметра режима, цель которого – повышение надежности выявления первого цикла АР.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМНОГО ПАРАМЕТРА

Рассмотрим двухмашинную схему замещения электроэнергетической системы (рис. 1).

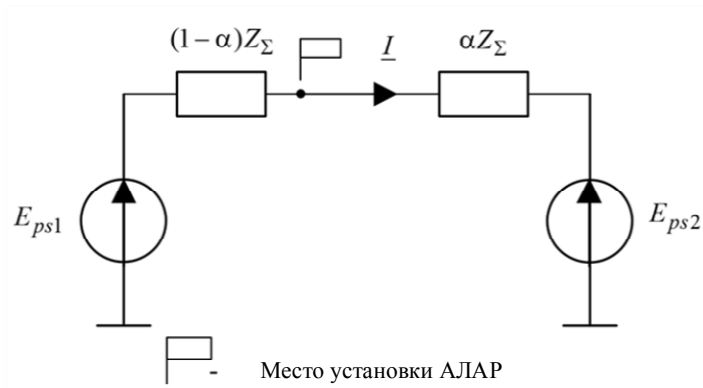


Рис. 1. Двухмашинная схема замещения ЭЭС

Характерной особенностью тока АР является колебание его действующего значения от максимума до минимума. Максимального значения ток достигает при угле передачи, близком к  $180^\circ$ , минимального – близком к  $0^\circ$  (рис. 2, 3):

$$I = \frac{2E}{Z_\Sigma} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

где  $E$  – ЭДС систем двухмашинной схемы замещения;  $\delta$  – угол передачи между ЭДС систем;  $Z_\Sigma$  – модуль эквивалентного сопротивления электропередачи.

Однако в режиме синхронных качаний кривая действующего значения тока также имеет колебательный характер, но амплитуда колебаний уменьшается со временем, и длительность цикла синхронных качаний превышает критическую длительность цикла АР (рис. 4).

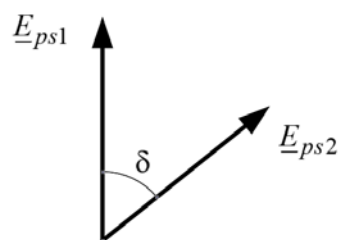


Рис. 2. Расчет угла  $\delta$



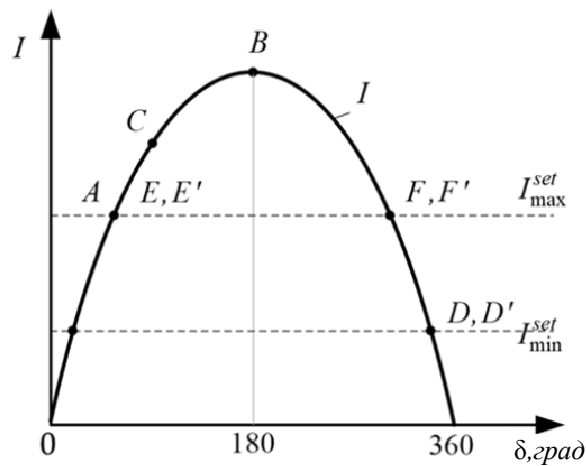


Рис. 3. Зависимость действующего значения тока  $I$  от угла передачи  $\delta$

Резервная АЛАР учитывает разницу в характере колебаний тока в этих режимах и разграничивает режим синхронных качаний и АР по длительности цикла колебаний. В известных реализациях резервной АЛАР 2 распознавание колебаний тока и измерение длительности их цикла производят по моментам последовательного перехода кривой действующего значения тока через верхний и нижний пороги. За длительность цикла АР принимают интервал времени между двумя соседними одноименными переходами кривой тока: верхнего порога по направлению «снизу-вверх»  $I_{\max}^{\text{set}}$  и нижнего порога – «сверху-вниз»  $I_{\min}^{\text{set}}$  (рис. 5).

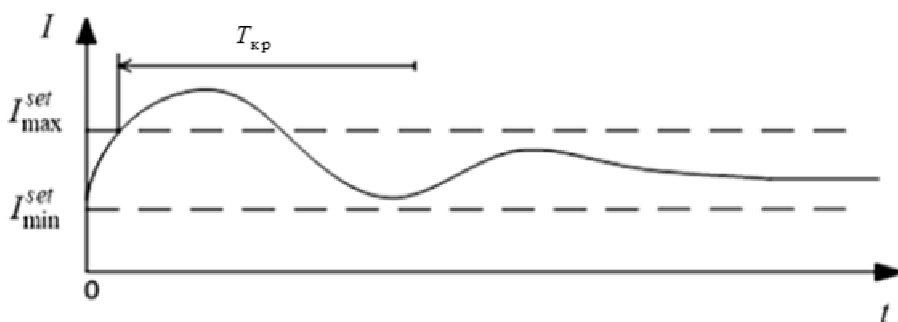


Рис. 4. Ток в режиме синхронных качаний

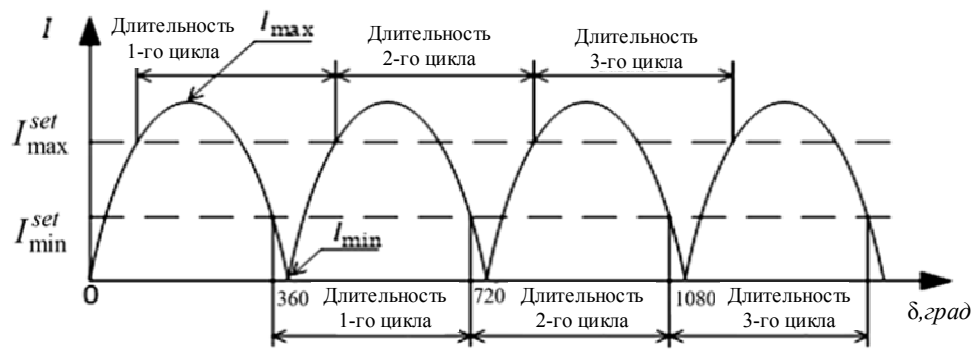


Рис. 5. Ток в асинхронном режиме

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известные реализации АЛАР 7, контролирующие длительность цикла АР по двум соседним одноименным переходам кривой через порог, имеют общий недостаток, характерно проявляющийся в начале развития АР, когда процесс потери устойчивости электрической сети носит длительный характер. Это происходит, например, при росте нагрузки в электрической сети, в связи с чем кривая тока может пересечь верхний порог задолго до наступления АР.

Рассмотрим режим медленной потери устойчивости (рис. 6). Предпосылка к потере устойчивости появляется в точке  $A$  (рис. 3 и 6), когда ток превысит верхний порог и продолжит непрерывно расти. В точке максимума кривой тока (точка  $B$  на рис. 3 и 6) электрическая сеть теряет устойчивость. Поскольку длительность цикла АР измеряют как интервал времени между двумя соседними одноименными переходами кривой тока верхнего или нижнего порогов, то в данном случае отсчет первого цикла начнется уже в точке  $A$ , задолго до точки потери устойчивости (точка  $B$ ). Из-за невысокой скорости развития процесса потери устойчивости измеряемая продолжительность первого цикла в этом случае превысит уставку по длительности цикла  $T_{кр}$ . Это приводит к прекращению отсчета длительности цикла, и в точке  $C$  (рис. 3 и 6) АЛАР исключит точку  $A$  из рассмотрения, в связи с чем первый цикл АР будет пропущен, и, следовательно, ликвидация асинхронного режима будет затянута.

### 3. РЕЗЕРВНАЯ АЛАР С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА РЕЖИМА

Повышение надежности выявления первого цикла АР в резервной АЛАР с интеллектуальным контролем изменения параметра достигается благодаря отсчету его длительности только после потери устойчивости системой.

Сущность предлагаемого алгоритма АЛАР основана на принципе перемежаемости переходов кривой действующего значения тока через заданные пороги. Согласно принципу перемежаемости переходов предлагается измерять длительность первого цикла АР по одноименным переходам кривой тока через верхний порог по направлению сверху – вниз (точки  $F$  и  $F'$  на рис. 3 и 7) при выполнении условия, что между ними находится точка перехода кривой через нижний порог (точки  $D$  и  $D'$  на рис. 3 и 7). Поэтому отсчёт длительности первого цикла асинхронного режима начинается уже после потери устойчивости системой (после точки  $B$ ). В результате АЛАР правильно выявит первый цикл АР при длительном характере процесса потери устойчивости системы.

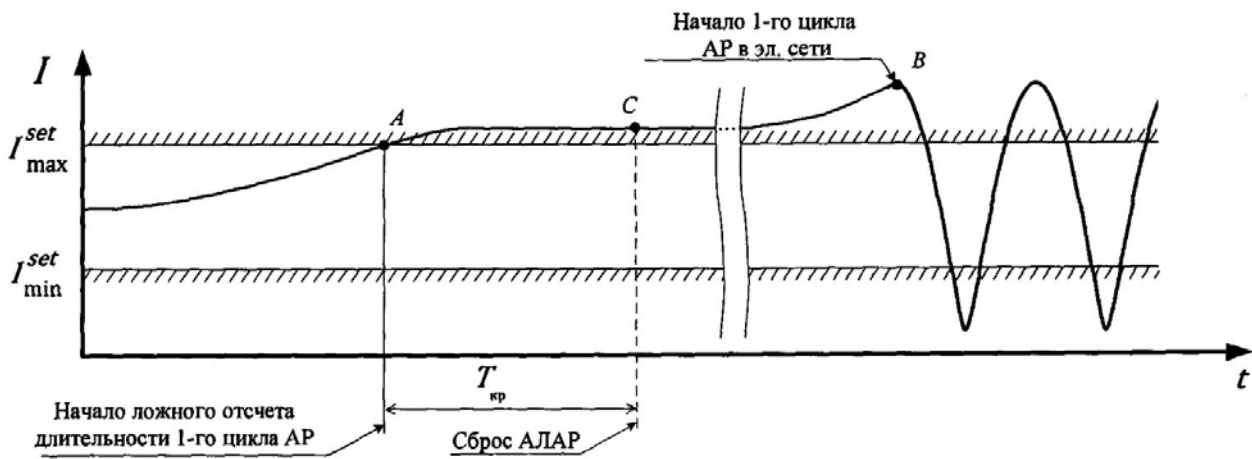


Рис. 6. Иллюстрация работы традиционных резервных АЛАР в условиях продолжительного процесса потери устойчивости

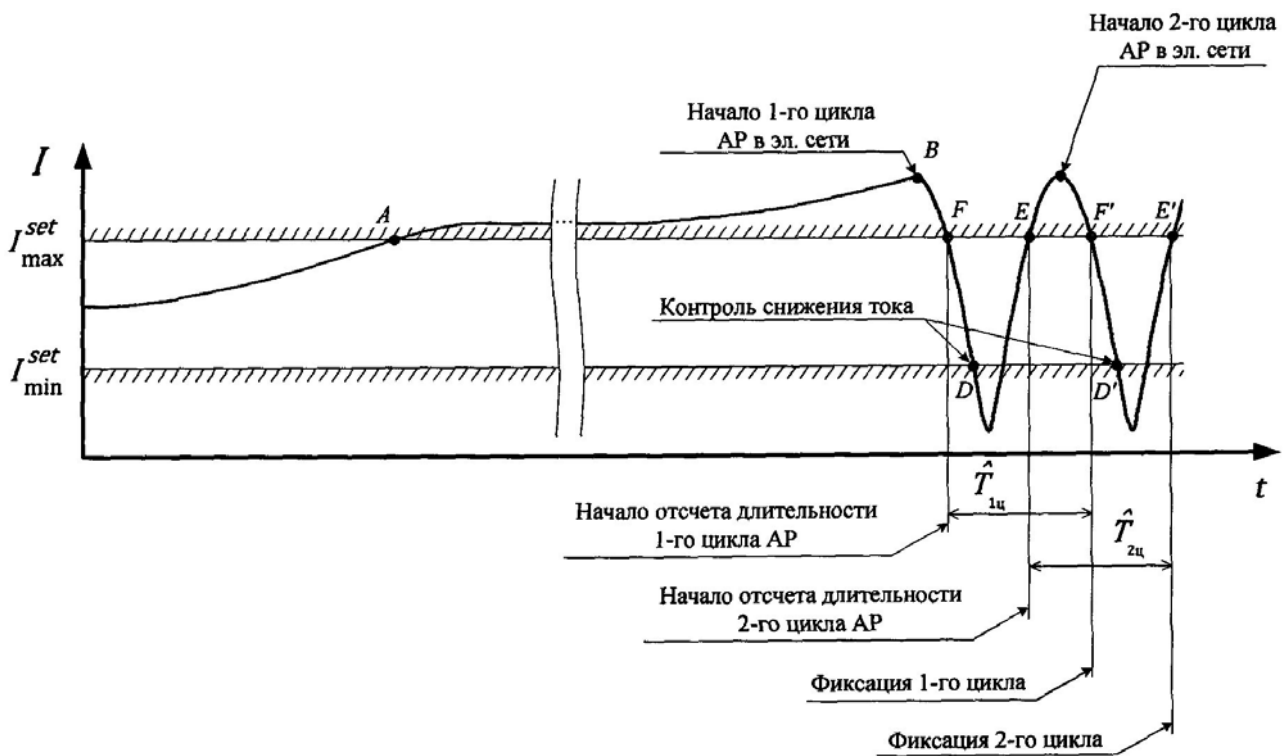


Рис. 7. Иллюстрация работы новой АЛАР в условиях продолжительного процесса потери устойчивости

В то же время, во избежание затягивания ликвидации АР целесообразно измерять длительность последующих циклов по двум соседним переходам кривой тока через верхний порог снизу – вверх (точки  $E$  и  $E'$ ).

Контроль длительности циклов асинхронного режима по переходам кривой тока через верхний порог является принципиально обоснованным,

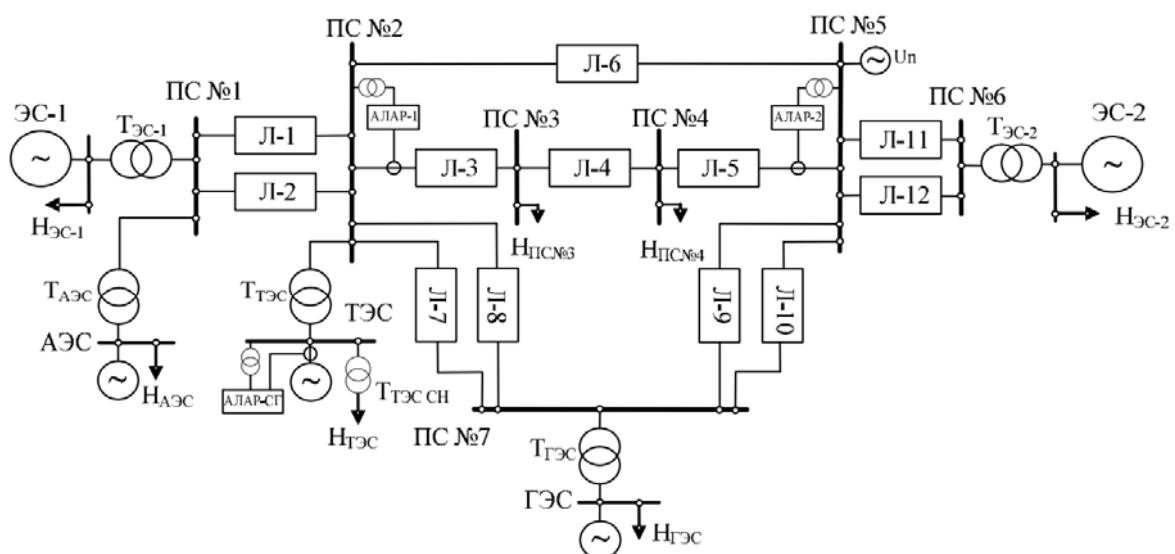


Рис. 8. Схема сети сертификационных испытаний: устройство АЛАР установлено на ПС № 2; в предаварийном режиме отключены АЭС, ТЭС и Л-8

поскольку потеря устойчивости происходит всегда при значительных токах (точка  $B$ ). Интеллектуальный контроль изменения тока позволит исключить ложное срабатывание АЛАР от колебаний тока в утяжеленном нагрузочном режиме.

#### 4. ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ РЕЗЕРВНОЙ АЛАР

Новый алгоритм резервной АЛАР успешно испытан на соответствие требованиям стандарта АО «СО ЕЭС» 8 (рис. 8) в аварийных режимах при длительном монотонном увеличении перетока мощности по Л-3 – Л-5 (опыт 10.1.10 сертификационных испытаний устройств АЛАР, предназначенных для установки в электрической сети).

На рис. 9 приведены результаты одного из испытаний новой АЛАР. Как видно, кривая тока переходит через верхний порог задолго до наступления АР. При этом новая АЛАР верно фиксирует циклы АР и выдает сигнал срабатывания в момент фиксации четвертого цикла АР согласно заданным уставкам.

#### ВЫВОДЫ

Интеллектуальный контроль характера изменения тока исключает ошибочный отсчет длительности цикла АР и обеспечивает надежное функционирование АЛАР в утяжеленном нагрузочном режиме.

Предложенный алгоритм АЛАР защищен патентом РФ на изобретение № 2706215 от 15.11.2019 9 и реализован в шкафах цифровой противоаварийной автоматики производства ООО НПП «ЭКРА», успешно прошедших сертификационные испытания в органе по добровольной сертификации СДС «СО ЕЭС» АО «НТЦ ЕЭС».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Я.Е. Гоник, Е.С. Иглицкий, Автоматика ликвидации асинхронного режима. М.: Энергоатомиздат, 1988. 112 стр.

2. A. Nikitina, V. Petrov and V. Naumov, "Smart Power Swing Protection for the Line with Tap," 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), 2020, pp. 26-30, DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281216.
3. S. Warathe and R. N. Patel, "Algorithm for power swing protection using DSP based numerical relay," 2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2015, pp. 762-767, DOI: 10.1109/SPIN.2015.7095411.
4. A. Marusic, S. Skok, I. Ivankovic and R. Vljajcevic, "Pole slip protection on 400 kV transmission line," 2005 IEEE Russia Power Tech, 2005, pp. 1-4, DOI: 10.1109/PTC.2005.4524409.
5. M. Afzali and A. Esmailian, "A novel algorithm to identify power swing based on superimposed measurements," 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2012, pp. 1109-1113, DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221547.
6. B. Taheri, F. Razavi and S. Salehimehr, "Power Swing Detection Using the Variation Rates of the Average Value of Apparent Power," 2019 International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS), 2019, pp. 38-43, DOI: 10.1109/IPAPS.2019.8642060.
7. Принципиальные схемы устройств автоматического прекращения асинхронного хода. Типовые материалы для проектирования №. 407-0-174. 88. Институт "Энергосетьпроект", 1988.
8. Стандарт организации. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Автоматика ликвидации асинхронного режима, нормы и требования, "СО-ЕЭС", ОАО, СТО 59012820.29.020.008-2015.
9. А.Н. Никитина, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов, Способ выявления асинхронного режима электрической сети. Патент Российской Федерации, №. 2706215, 2019.

*Ямалов И. И., Шарафутдинов Ш. Н., Уразбахтин Р. Р., Левченко Л. И., Султанов А. М.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОНИКИ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

*Аннотация:* В данной статье рассмотрены причины возникновения вибраций в блоках электроники. Приведены средства, обеспечивающие виброустойчивость аппаратуры.

*Ключевые слова:* виброустойчивость, антивибрационные системы, блок электроники

В настоящее время область применения радиоэлектронных средств неуклонно расширяется. Это приводит к тому, что в таких отраслях промышленности как кораблестроение, авиастроение, ракетостроение, а также космической промышленности, в производящиеся аппараты все больше и больше внедряется радиоэлектронная аппаратура. В этих аппаратах отказ даже одного узла может привести к полному отказу или же к некорректному функционированию всего объекта. В связи с этим, по мере развития РЭА,

требования, предъявляемые к надежности радиоэлектронных средств, постоянно увеличиваются [1].

Механические воздействия, превышающие максимально допустимый для радиоэлектронных средств порог, могут приводить к изменению сопротивления компонентов, изменению магнитной проницаемости ферритовых сердечников, разрушению электрических контактов, деформации радиоэлектронных компонентов, а также вызывать наводки и приводить к изменению параметров электромагнитных полей. Механические воздействия являются причиной возникновения помех при передаче данных, снижают точность работы аппаратура, а также приводят к разрушению элементов конструкции. [2] Поэтому важно закладывать испытания на виброустойчивость, даже несмотря на то, что в итоге тестирование блока электроники может составлять половину его стоимости.

Наиболее уязвимым местом с точки зрения виброустойчивости блока электроники является печатный узел [3]. При проектировке блока электроники, ему уделяется особое внимание. Механические воздействия передаются на аппаратуру разными путями. При проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) чаще всего учитывают механические воздействия, которые передаются на РЭС через точки крепления к движущемуся объекту. Уровень этих воздействий обычно известен. Их можно измерить с помощью датчиков, закрепленных в местах крепления РЭС [4].

Кроме того, механические воздействия могут передаваться в виде давления воздуха окружающей среды на стенки корпуса аппаратуры или давления воздуха внутри подвижного объекта. Так, например, акустические шумы, то есть колебания воздуха, могут вызывать сложные колебания аппаратуры, что приводит к искажениям сигналов, а также отделению от печатной платы припаянных радиоэлектронных компонентов.

Согласно различным данным причиной от 30 до 50 % отказов радиоэлектронных средств приходится на механические воздействия, которые приводят к выходу механических характеристик на элементах конструкции за

допустимые пределы. Отказы, причиной которых являются механические воздействия, выявляются уже на конечных этапах разработки, приводят к продолжительной доработке конструкции. Всё это увеличивает как сроки разработки РЭС, так и затраты на разработку. Применение методов математического моделирования механических воздействий на бортовые радиоэлектронные средства способствуют сокращению сроков и стоимость работ по проектированию [5].

Возникновение вибраций, в основном, является следствием колебаний точек крепления радиоэлектронных средств. Вибрация бывает гармоническая и случайная. Гармоническую вибрацию разделяют на два типа: моногармоническая; полигармоническая [6]. К параметрам, характеризующим вибрацию, можно отнести виброперемещение, виброскорость и виброускорение. Кроме того, в процессе транспортировки, при монтаже, а также во время эксплуатации радиоэлектронная аппаратура может быть подвержена ударным воздействиям. Во время удара конструкция и элементы РЭС испытывают большие нагрузки в течение короткого промежутка времени. При ударных воздействиях ускорения на элементах могут достигать больших значений, что приводит к повреждению элементов. Удары приводят к возникновению затухающих колебаний в элементах конструкции РЭС. Наиболее сильное негативное влияние при вибрационных воздействиях оказывают резонансные явления.

Поэтому необходимо предусмотреть защиту РЭС сразу и от ударов, и от вибраций. Движение с переменной скоростью характеризуется линейным ускорением. На бортовые РЭС, которые установлены на объектах, движущихся с переменной скоростью, действует линейное ускорение.

Наиболее часто подвержены разрушениям соединения, разъемные и неразъемные, точки креплений, места конструкций с отверстиями, изгибы, детали конструкции, которые подвержены трению, а также детали, которые испытывают удары. Механические разрушения относятся к изменениям необратимого характера. Наиболее подвержены разрушениям элементы,



нагруженные во время монтажа. Это могут быть заклепки, болты и др. Важно обеспечить запас прочности таких деталей, чтобы не допустить их поломки. Если во время монтажа электро-радиокомпонентов они получили лишнее механическое напряжение, возрастает риск их отрыва.

### Средства повышения надежности оборудования

Одним из методов решения данной проблемы является установка антивибрационных систем (опор) различных типов. Например, установка резиновых виброизолирующих пластин (рис. 1) Vibro-EP от компании «Гидро-гарант» [7] позволит обеспечить контроль вибрации, пассивную виброзащиту, способность выдерживать большие нагрузки. Также данная конструкция обладает простотой установки.

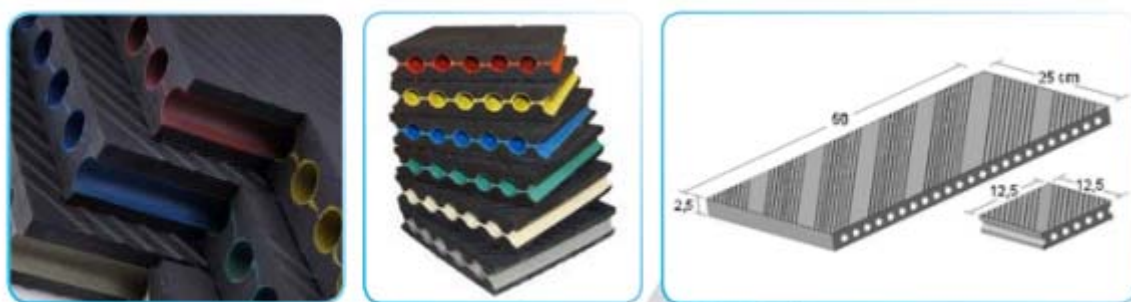


Рис. 1. Внешний вид вибропоглощающей пластины

Также существуют следующие виды антивибрационных систем:

- Антивибрационные опоры из стальной пружины и каучуковых вставок Vibro-SM



Рис. 2. Виброизолятор Vibro-SM

- Пружинные виброизоляторы из четырех стальных пружин и вставок из эластомера Vibro-MS



*Рис. 3. Виброизолятор Vibro-MS*

- Антивибрационные Пластины Vibro-EP Metal, состоящая из эластичного элемента и со специально созданной оцинкованной металлической крышкой



*Рис. 4. Антивибрационная Vibro-EP Metal*

- Антивибрационная опора, поддерживающая вибрацию в каждом направлении (x, y, z) Vibro-3D



*Рис. 5. Антивибрационная опора Vibro-3D*

- Виброгасители, имеющие особую конструкцию для контроля ударных и вибрационных нагрузок Vibro-EM.2 и Vibro-EM.3



а



б

*Рис. 6. Виброгасители:  
а) Vibro-EM.2; б) Vibro-EM.3*

Также существует и большое количество других антивибрационных опор, неупомянутых в данной статье.

Существует метод активной виброзащиты, в основе которой лежит использование электрогидравлических систем дроссельного регулирования, обладающие сравнительно высоким быстродействием. При установке акселерометра на каркас системы, в качестве основного управляющего сигнала используется сигнал, снимаемый с акселерометра, вследствие этого такая система является системой управления по отклонению выходной величины, то есть системой с управлением по сигналу ускорения объекта виброзащиты. Если же акселерометр устанавливается на основании, то это – система управления по возмущающему воздействию. Если сигнал снимается с акселерометра, который установлен как на основании, так и на каркасе системы, то это электрогидравлическая система с комбинированным управлением.

Также существуют пневматические средства активной виброизоляции. Пневматические системы могут обладать различной конструкцией. В одних случаях используются проточные камеры, давление в которых изменяется с помощью различных дроссельных устройств, в других – исполнительным органом может являться цилиндр двойного действия, давление, в камерах которого регулируется струйным или золотниковым распределительным устройством. В системах такого рода кроме рабочих камер, объем которых ограничен подвижным элементом, используются камеры постоянного объема, соединяющиеся дросселями с рабочими камерами.

В статье были представлены различные средства для обеспечения защиты бортовых блоков электроники от внешних механических воздействий. Представлены виды существующих видов внешних механических нагрузок, одним из которых является вибрационное воздействие. Рассмотрены методы и средства защиты от внешних вибрационных шумов. Наиболее эффективными среди них являются системы активной виброзащиты, в которых присутствуют как элементы демпфирования, так и элементы с дополнительным источником энергии, благодаря чему появляется возможность изменять жесткость подвесов,

следовательно, возможность уменьшить влияние вибрационных нагрузок на устройства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Остроменский П.И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов. – Новосибирск, издательство Новосибирского университета. 1992.
2. Сысуев В.А., Яньков Р.В., Лысенко А.В., Алмаметов В.Б., Тюрина Л.А. СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ // НиКа. 2020. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/covremennye-sredstva-zaschity-bortovyh-radioelektronnyh-ustroystv-ot-vneshnih-mehanicheskih-vozdeystviy> (дата обращения: 14.12.2021).
3. Данилова Е.А., Кузина Е.А., Лысенко А.В., Трусов В.А., Юрков Н.К. К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ. Научный вестник МГТУ ГА. 2017;20(5):109-115. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2017-20-5-109-115>
4. Ильинский В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. – М.: Радио и связь, 1982. – 295 с.
5. Новиков В.С. Техническая эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования. М.: Транспорт, 1987. Головин, П.Д. Применение метода квазиобразцового интервала времени для раздельного измерения параметров параметрических датчиков / П.Д. Головин, А.В. Лысенко, Н.К. Юрков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 4 (24). С. 149-157.
6. Талицкий Е.Н. Расчет вибро-, ударопрочности и устойчивости конструкции электронных средств: Учебн. пособ. – Владимир: Владим. гос.ун-т, 1998. –58 с.
7. Антивибрационные системы [Электронный каталог]. – URL: <http://гидро-гарант.москва/assets/files/katalog-interaktivnyj.pdf>

*Ямалов И. И., Шарафутдинов Ш. Н., Уразбахтин Р. Р.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ**

*Аннотация:* В данной статье рассмотрены задачи тестирования на электромагнитную совместимость. Описаны методы проверки печатных плат на электромагнитную совместимость.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, печатная плата, тестирование, техническое средство, обеспечение безопасности.

Необходимость соответствия характеристик печатных плат окружающей электромагнитной обстановке более крупных электронных систем является достаточно важной проблемой. Значимость этой проблемы увеличилась в связи с электрификацией различных транспортных средств, производственного и бытового оборудования, в частности с расширением применения электрических

машин (ЭМ) в различных областях техники, для управления которыми требуются блоки электроники (БЭ). Например, на летательных аппаратах, спроектированных в рамках концепции более электрического самолета (БЭС), актуально применение стартеров-генераторов для обеспечения запуска авиационного двигателя и генерирования электроэнергии во время полета, для обеспечения работы которого необходим сложный БЭ. При проектировании печатных плат, входящих в состав БЭ, проблема ЭМС зачастую упускается из виду из-за существования других вопросов, связанных с размещением большого числа компонентов в ограниченном пространстве.

Задачей электромагнитной совместимости (ЭМС) является обеспечение баланса между электромагнитными сигналами, генерируемыми всеми радиоэлектронными средствами в определенном пространстве. Тестирование является основным средством достижения этой цели и заключается в оценке уровней электромагнитного излучения исходящего от разрабатываемой платы, а также воздействующего на нее, для определения влияния возможных помех на работу платы и потенциальное влияние на окружающую ее электронику [1].

Существует ряд причин, по которым платы должны проходить тестирование на ЭМС:

- Безопасность. Основная задача тестирования на ЭМС – обеспечение безопасности при использовании электронного оборудования.

- Надежность. Платы следует тестировать, чтобы выяснить, будут ли они функционировать должным образом, и соответствовать своим эксплуатационным характеристикам.

- Нормы и стандарты. Большинство испытаний на ЭМС являются обязательными и определяются стандартами. Они могут определяться нормативами страны-производителя или отраслью, для которой предназначена плата. Выполнение требований и стандартов по ЭМС и безопасности является обязательным и проверяется специальными органами сертификации [2].

Необязательными для тестирования на ЭМС являются макетные и опытные образцы, единичные изделия, не предназначенные для продажи, а

также устройства специального назначения, поставляемые заказчику на особых условиях [3].

Тестирование на ЭМС может включать следующие типы испытаний [4]:

1. На восприимчивость электростатическому разряду. Она делится на проверку контактным разрядом и воздушным разрядом. При контактном испытании наконечник имитатора электростатического разряда помещают на контрольную точку и производят разряд. Во втором случае имитатор заряжается до заданного напряжения и приводится в контакт с тестируемым объектом. Разряд, если он возникает, происходит через воздушный зазор между наконечником имитатора и платой до того, как произойдет соприкосновение. Величина этого зазора, зависит от атмосферного давления, температуры, относительной влажности воздуха, а также угла наклона и скорости движения имитатора. Как правило, требуются оба типа тестов. Тестируемый объект может реагировать на разряд, но его работоспособность должна восстановиться после теста. Данный вид тестирования проводится согласно ГОСТ 30804.4.2-2013.

2. На устойчивость к излучаемому электрическому полю. Целью данного тестирования является проверка устойчивости платы к ближайшим радиопередатчикам. Обычно тестируется диапазон частот от 80 МГц до 1 ГГц, в некоторых случаях – до 6 ГГц. Этот тест проводится в безэховой камере, тестируемый объект рассматривается с нескольких сторон. Для успешного прохождения испытания плата должна сохранять работоспособность во время теста, или самостоятельно восстанавливать ее без потери данных. Регламентируется ГОСТ Р 51317.4.3-99.

3. На скачки напряжения. Этот тест имитирует процессы на входе питания тестируемого объекта при ударе молнии. При этом на линейный вход платы подаются большие скачки энергии. Методы испытаний регламентируются ГОСТ 51317.4.5-99.

4. На воздействие магнитных полей промышленной частоты. Это испытание следует проводить для изделий, которые, как ожидается, не имеют

устойчивости к магнитным полям промышленной частоты. Например, дисплеи на электронно-лучевых трубках, датчики магнитного поля и датчики Холла. В центр большой катушки, по которой протекает ток промышленной частоты, помещается плата и проверяется на корректность работы. Данный тест не требуется для большинства изделий, однако может быть проведен по требованию заказчика.

5. На провалы и пропадания напряжения. Этот тест разработан для моделирования мгновенных колебаний входного напряжения питания. Существует три вида испытаний, которые выполняются, как правило, с помощью цифрового источника питания. Первый - это снижение напряжения  $>95\%$  за половину цикла входящей мощности. Объекту тестирования разрешено реагировать, но он должен самостоятельно восстановить работу без вмешательства оператора. Второй тест – снижение на  $30\%$  на полсекунды, после которого функционирование должно восстановиться. Третий часто используемый тест - это снижение входного напряжения  $>95\%$  в течение 5 секунд. Если в изделии нет встроенной батареи или блока питания, оно прекратит работу. Если оператор может восстановить его работу и данные в соответствии с инструкцией, изделие проходит это испытание.

Для каждого изделия методика проверки может отличаться, из-за чего нельзя создать типовой набор тестов на ЭМС. При решении вопроса ЭМС следует опираться на параметры технического средства.

При тестировании на ЭМС в зависимости от объема и методов проверок обеспечивается либо доказательство работоспособности изделия в заданной электромагнитной обстановке, либо устойчивость к наихудшим условиям, с которым оно может столкнуться при работе. Виды тестирования, их количество и жесткость испытаний должны выбираться в зависимости от самого изделия, сферы применения, а также условий в которых оно будет работать [5].

Требования стандартов по ЭМС постоянно меняются и ужесточаются, из-за чего методы проверки и аппаратура для тестирования также развиваются. Несоответствие требованиям ЭМС может быть серьезной проблемой при

разработке в зависимости от типа платы. Для отраслей с более строгими ограничениями (аэрокосмическая, автомобильная, медицинская, военная) несоблюдение требований является синонимом непригодности.

По этой причине разработчику необходимо уже на этапе проектировки платы учитывать вопросы ЭМС, так как на более поздних этапах разработки проблемы совместимости могут привести к многократному увеличению стоимости изделия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. Зобнин “Как пройти испытания на электромагнитную совместимость,” Современная электроника, №2, С. 54-58, 2008.
2. В.К. Рентюк “Электромагнитная совместимость: проблема от которой не уйти,” Электромагнитная совместимость в электронике, №7, С. 4-5, 2017.
3. Д. Кондрашов, А. Шостак “Системы тестирования на ЭМС микросхем и печатных плат,” Электроника. Наука. Технология. Бизнес, №5, С. 84-88, 2019.
4. G. Pettit “Summary of commercial EMC tests,” EMC Testing Guide, pp. 9-14, 2017.
5. Z. Kvasznicza , I. Gyurcsek “Mathability of EMC Emission Testing for Mission Crucial Devices in GTEM Waveguide,” Acta Polytechnica Hungarica, v.18, №1, pp.159-173, 2021.

*Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Жеребцов А. А., Жарков Е. О., Гусаков Д. В.*  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ШЕСТИГРАННЫМ ЯКОРЕМ ДЛЯ РЫЧАГА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

*Аннотация:* В статье описывается процесс разработки линейного электропривода для рычага управления двигателем летательного аппарата. Проведен обзор литературных источников по разработке линейных электроприводов различного применения. Приведены результаты компьютерного моделирования электромагнитных процессов линейного электропривода с шестигранным якорем и результаты аналитического расчета.

*Ключевые слова:* линейный электропривод, рычаг управления приводом, шестигранный якорь, компьютерное моделирование.

## **ВВЕДЕНИЕ**

За последние 5 лет развитие электродвижения в транспортной отрасли промышленности стало мейнстримом, благодаря таким преимуществам как повышение экологичности, увеличение энергоэффективности при сниженных массогабаритных показателях и безопасность. В частности, в концепции «более электрического самолета» отсутствуют гидравлические и пневматические



системы, обычно предназначенные для работы гидро- и пневмоприводов органов управления и шасси, которые заменяются электроприводами. Также у такого самолета нет отбора воздуха от двигателей для противообледенительной системы и системы кондиционирования воздуха. За счет этого снижается масса и повышается надежность всех систем, повышается КПД авиадвигателей, что в итоге приводит к снижению расхода топлива и вредных выбросов [1].

Одним из узлов летательного аппарата, где применение электропривода целесообразно является рычаг управления двигателем (РУД). РУД является средством, с помощью которого пилот контролирует количество топлива, подаваемого в двигатель, с которым он связан. Для более точного позиционирования РУД применение линейного электрического привода (ЛЭП) наиболее актуально.

Основные функции РУД заключаются в выдаче в систему автоматического управления (САУ) двигателя электрических сигналов управления, соответствующих положению РУД; обеспечение перемещения якоря (подвижной части электропривода) вручную водителем (ручной и аварийный режимы), автоматически по сигналам из комплексной системы управления (режим автоматического управления тягой (АУТ)) и в режиме совместного функционирования двух ЛЭП; обеспечение создания усилия, противодействующему ручному перемещению якоря (усилие загрузки), с возможностью его регулирования водителем в наземных условиях и в полете; ограничение перемещения якоря в положениях: максимальном, минимальном форсаже, полном форсаже; отключение режима АУТ путем приложения к якорю усилия превышающего установленное усилие загрузки; конструктивное сопряжение ЛЭП с корпусом РУД; взаимодействие двух ЛЭП для двухкабинного самолета; управление электрическим питанием нагревательных элементов на рукоятках РУД по сигналам от температурных датчиков.

ЛЭП является составной частью РУД. Неподвижная часть электродвигателя ЛЭП крепится к корпусу РУД, а подвижная часть (якорь) электродвигателя ЛЭП сопрягается с РУД. Управление электродвигателем ЛЭП

осуществляется с помощью электронного модуля управления (ЭМУ) по сигналам от двух потенциометрических датчиков положения якоря.

## 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

За последние несколько лет линейные электроприводы получили большое развитие для разных отраслей промышленности благодаря их простому управлению и точности позиционирования.

В статье [2] приведены результаты исследований трубчатого синхронного реактивного линейного привода с поперечным магнитным потоком. Такой тип имеет ряд преимуществ, включая простую конструкцию, низкую стоимость и высокую плотность энергии; недостатками являются высокие пульсации, которая не позволяет использовать его во многих отраслях применения. В статье предлагается новая многоступенчатая конфигурация полюсов привода для уменьшения силовой пульсаций. На основе распределения поперечного потока из анализа методом конечных элементов (FEA) исходный полюс привода в форме кольца делится на две или три группы с учетом симметрии радиальной силы, и каждая группа смещается с определенным смещением в продольном направлении.

В статье [3] предлагается новая конструкция трубчатого линейного двигателя для предотвращения изгибов по тяговому усилию. Статор предлагаемого двигателя разделен на внутреннюю и внешнюю цилиндрическую структуру, обмотки якоря расположены между внутренним и внешним цилиндрами, на валу двигателя расположены постоянные магниты. Согласно результатам исследований, предложенная конструкция может предотвратить изгиб вала двигателя и решить проблему больших колебаний тяги линейных двигателей. В заключении делается вывод о том, что пиковая тяга двигателя максимальна, если для внутреннего цилиндра выбран материал с низкой проницаемостью.

В статье [4] рассматривается новый тип линейного короткоходового высокотемпературного электропривода, который был разработан для применения в аэрокосмической отрасли. В качестве активных материалов

использовались плакированные никелем медные проволоки с керамической изоляцией и кобальтовым сплавом.

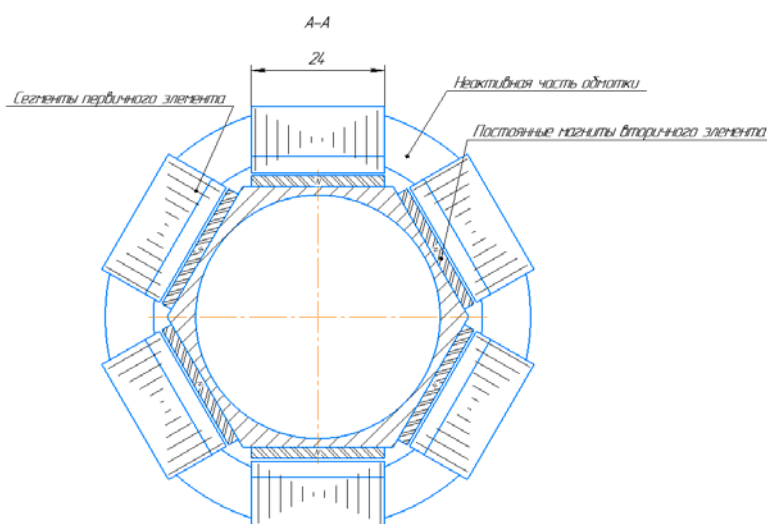
Статья [5] посвящена исследованиям магнитного поворотно-линейного привода. Предлагаемый привод использует постоянные магниты для передачи механической энергии от вращающейся части (ротора) к линейной части (ползун) или наоборот. Между ротором и ползуном отсутствует механический контакт, что обеспечивает более высокую надежность, меньшие требования к техническому обслуживанию и более длительный срок службы.

В статье [6] предлагается новый линейно-поворотный отказоустойчивый привод РМ с последовательными полюсами (СП) для интегрированной электромагнитной подвески и системы рулевого управления. Ключевым элементом предлагаемого привода является специальный статор и ротор КП. Комбинированная структура чередующегося расположения зубцов якоря и отказоустойчивых зубцов, два набора ортогональных концентрированных обмоток с дробным пазом, встроенных в соседний паз зубцов якоря, используются для достижения линейного и вращательного движения и управления их разъединением, а также повышения отказоустойчивости. возможность. За счет использования структур СП и модуляции потока не только плотность потока в воздушном зазоре может быть увеличена в окружном направлении, но также могут быть достигнуты более высокие характеристики крутящего момента при меньшем потреблении РМ. Соответствующие электромагнитные характеристики прогнозируются с помощью метода конечных элементов.

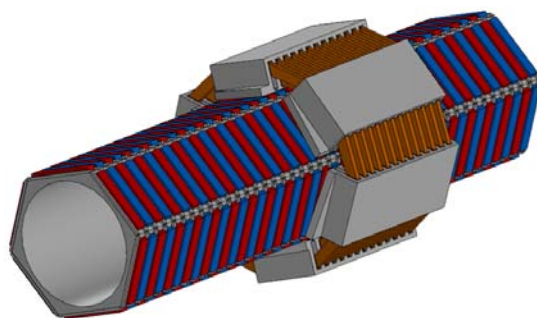
## 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЕТЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В качестве конструктива якоря ЛЭП для РУД была выбрана шестиугольная форма, индуктор которого выполнен с постоянными магнитами марки неодим железо бор (N50M). Первичный элемент (аналог статора во вращающихся ЭМ) имеет пазовую конструкцию, пульсации усилия, создаваемые взаимодействием зубцов и постоянных магнитов, устраняются

путем скоса паза на  $1/5$  зубцового деления, а также скосом торцов магнитопровода на 1 полюсное деление. Обмотка первичного элемента выполнена зубцовой, поскольку такой вариант при сравнении с распределенной имеет меньшее количество пазов. Соотношение пазов и полюсов подобрано так, чтобы минимизировать пульсации усилия даже при отсутствии скоса пазов, что снижает влияние неточности при сборке на итоговые пульсации. Конструкция вторичного элемента (аналог ротора во вращающихся электрических машинах) и вторичного элемента в поперечном разрезе имеет форму шестиугольника. Такой вариант относительно цилиндрической версии намного более прост в изготовлении, при этом не уступает ей по усилию на килограмм веса. Привод в поперечном разрезе показан на рис. 1, на рис. 2 – его 3D модель.



*Рис. 1. ЭМ в поперечном разрезе*



*Рис. 2. 3D модель ЭМ*

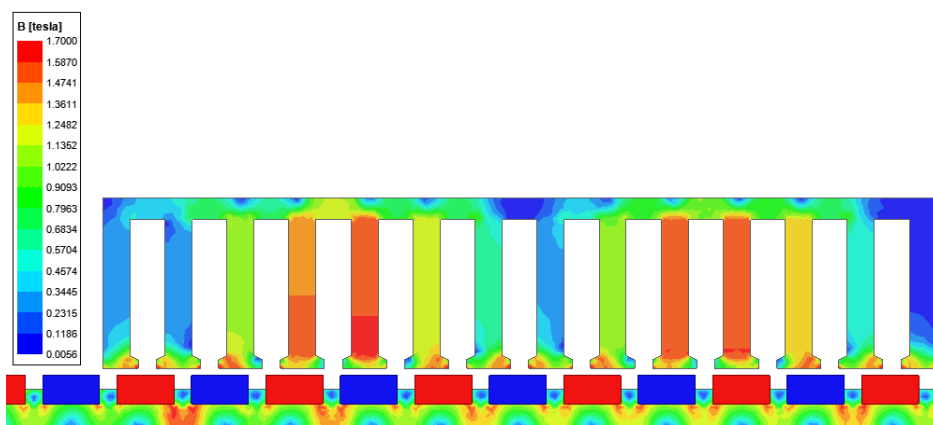
В табл. 1 представлены основные параметры привода.

Таблица 1

Основные параметры ЭМ

Параметр	Значение
Количество фаз	3
Количество пазов первичного элемента	13
Количество активных полюсов вторичного элемента	10
Общее количество полюсов вторичного элемента	44
Пульсации усилия на холостом ходу, Н	0
Пульсации усилия под нагрузкой, %	$\pm 0,2$
Материал магнитопровода первичного элемента	Сталь 2421, толщина листа 0,35 мм
Материал магнитопровода вторичного элемента	30ХГСА или Сталь 10
Температурный индекс обмотки	Не менее 100
Материал постоянных магнитов	N50M / НЖБ-50Н ТТУ 6391-004- 59990452- 2003
Масса постоянных магнитов, г	376
Масса стали первичного элемента, г	420
Масса стали вторичного элемента, г	775
Масса обмотки, г	220
Воздушный зазор, мм	0,5
Усилие, Н	33
Фазный ток, А	0,93
Плотность тока, $A/mm^2$	3,29
Линейная токовая нагрузка, кА/м	13,1
Тепловая нагрузка $AJ, A^2/(mm^2 \cdot cm)$	431
Потери в меди при 70°C	3,86
Тормозное усилие, создаваемое потерями в стали, Н	$2,2 \pm 0,25$
Период колебания тормозного усилия от потерь в стали, Вт	5,22 (полюсное деление)

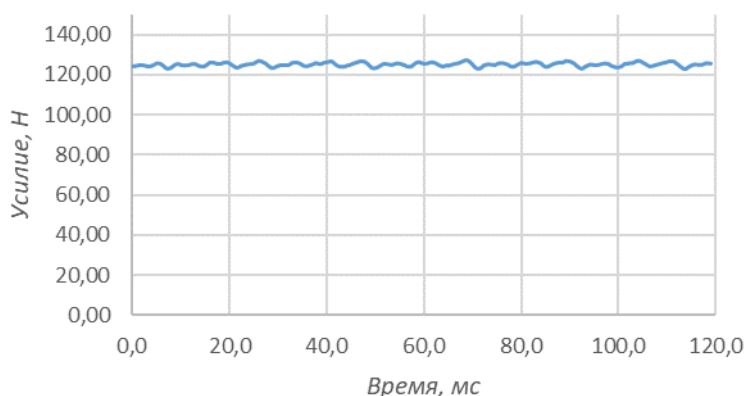
На рис. 3 показана картина магнитной индукции в сечениях магнитопроводов.



*Рис. 3. Картина магнитного поля*

Как видно из представленной картины магнитного поля максимальная индукция в зубце составляет 1,62 Тл, в спинке первичного элемента– 1,25 Тл, в спинке вторичного элемента – 1,5 Тл.

На рис. 4 показаны пульсации усилия под нагрузкой.



*Рис. 4. Пульсации усилия*

Как видно из представленного на рисунке 4 графика пульсации усилия составляют 4% от пика до пика.

На рис. 5 показаны линейные противо-ЭДС. Как видно, амплитудное значение ЭДС составляет 7,45 В, действующее – 5,25 В. Величина гармонических искажений в форме линейного ЭДС незначительна.

Стоит отметить, что несмотря на отсутствие пульсаций усилия связанных с притяжением магнитов к магнитопроводу статора, имеются пульсации, связанные с потерями в стали. Потери в стали создают постоянное сопротивление перемещению в 2,2 Н, при этом пульсации составляют 0,5 Н от

пика до пика (рис. 6). Период пульсаций составляет полюсное деление (5,22 мм).

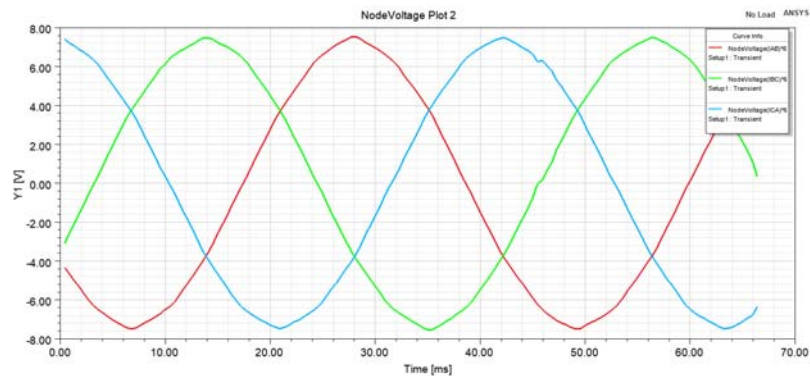


Рис. 5. Линейные противо-ЭДС

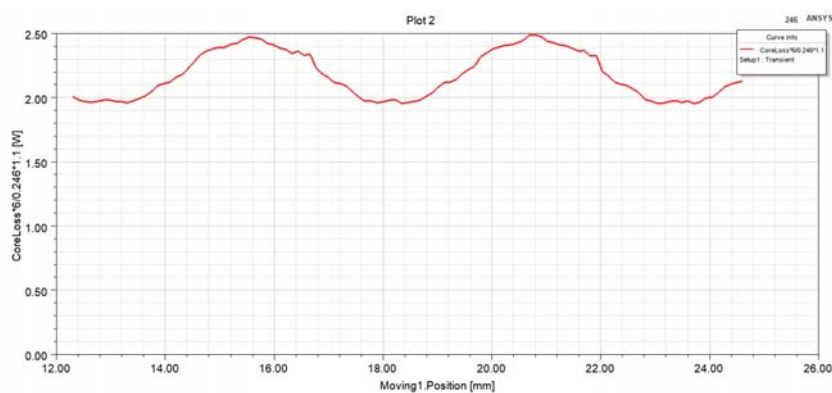


Рис. 6. Пульсации усилия от потерь в стали магнитопровода

Такие большие пульсации связаны с добавлением тринадцатого паза. В случае с магнитопроводом с двенадцатью пазами пульсации усилия от потерь в стали сокращаются в 3 раза, но при этом появляется несимметрия ЭДС в фазах. Для компенсации несимметрии можно рассмотреть вариант с неодинаковым количеством витков в фазах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение линейных электроприводов является актуальным направлением не только в авиационной промышленности, но и других отраслях благодаря точному позиционированию. Однако высокие пульсации, присущие этому типу привода по-прежнему остаются проблемой, требующей решения. В этом направлении ведутся исследования авторов и в дальнейшем планируется изготовление макетного образца привода с безжелезным статором, который потенциально способен снизить пульсации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михаил Гордин: полностью электрические самолеты появятся до 2035 года. URL: <https://www.aviaport.ru/digest/2020/04/20/635491.html>
2. Zhu Zhang, Hong Liu, «A Novel Force Ripple Reduction Method of Tubular Linear Switched Reluctance Actuators based on Multi-stages Translator Poles», 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 1-3 July 2021, Wuhan, China, DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505980
3. Wenbin Yu, Guolai Yang, Zixuan Li, Dianrong Wang, Xiuye Wang, «A tubular linear motor structure suitable for large thrust», Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 35, no. 11, 2021, pp. 4987- 4995, DOI 10.1007/s12206-021-1017-y.
4. Jacek F. Gieras, «Design of a High- Temperature Linear Electromagnetic Actuator», 2019 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 1-3 July 2019, Neuchatel, Switzerland, DOI: 10.1109/LDIA.2019.8770981.
5. G. Kim, K. Hirata, «Proposal of a Three-Degree-of-Freedom Linear-Rotational Resonant Actuator and Inverter Topology», IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 2, 2021, DOI: 10.1109/TMAG.2020.3012200.
6. Guangyao Jiang, Huawei Zhou, Weiguo Tao, Guohai Liu, «Design and Analysis of a Linear-Rotary Fault-Tolerant Consequent-Pole PM Actuator», 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 1-3 July 2021, Wuhan, China, DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505726.

*Пронин Е. А., Нуриева А. М., Лелюх П. Ю., Павленкова А. А., Уразбахтин Р. Р.*  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОКРЕМНИСТНЫХ ПОРОШКОВ СТАЛИ (6–7%) В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

*Аннотация:* В настоящее время аддитивное производство получает развитие во многих отраслях промышленности, в том числе и в электромеханике. Одним из перспективных направлений развития электрических машин является использование высококремнистой стали из порошкового  $FeSi6,5 (\pm 0,5\%)$  совместно с аддитивным производством. Данная статья представляет собой краткий обзор научных публикаций последних лет, посвященных 3D-печати из порошкового  $FeSi6,5 (\pm 0,5\%)$ .

*Ключевые слова:* аддитивное производство, 3D-печать, высококремнистая сталь.

В последние несколько лет аддитивное производство пользуется постоянно растущим успехом благодаря очень большой свободе проектирования, которое оно предлагает для изготовления изделий из пластика и металла. Важным классом магнитомягких материалов являются кремнистые стали, которые представляют собой сплавы железа с кремнием с содержанием последнего 2-7%. В семействе кремнистых сталей сплавы  $FeSi6,5$  обладают высоким потенциалом для применения в электротехнических устройствах из-за их высокого удельного электрического сопротивления, близкой к нулю магнотострикции и низкой магнитокристаллической анизотропии. Несмотря на



их высокий потенциал, эти сплавы редко используются в коммерческих целях из-за их очень ограниченной пластичности, что приводит к плохой обрабатываемости. Данную проблему может решить использование аддитивного производства в изготовлении деталей из порошковой высококремнистой стали [1]. В данной статье дан краткий обзор научных публикаций последних лет, связанных с исследованиями 3D-печати с использованием порошковой высококремнистой стали.

В [1] представлено исследование по металлургии высококремнистой стали с содержанием кремния 6,9%, полученной при помощи аддитивного производства с использованием селективного лазерного плавления (*SLM*). Для получения опытных образцов использовалась установка *Realizer SLM-50*, настройки которой представлены в табл. 1.

Высококремнистая сталь, полученная путем *SLM*, представляет собой единую ферритную фазу, и линии сверхструктуры не были обнаружены при рентгеновских измерениях, что свидетельствует о высоких скоростях охлаждения *SLM*, замедляющих формирование упорядоченной фазы. Замечено, что микроструктура образцов характеризуется столбчатыми зёрнами, ориентированными в сторону направления сборки. По всей видимости, увеличение подводимой энергии обрабатывающего лазера способствует удлинению зёрен как вдоль направления сборки, так и в плоскости сканирования образца.

Таблица 1

Параметры, применяемые для печати из порошкового FeSi6,9 [1]

Параметр SLM	Значение	Единицы измерения
Положение фокусировки лазерного луча	13,1	мм
Интервал штриховки	60	мкм
Толщина слоя	25	мкм
Мощность лазера (P)	70	Вт
Скорость лазерного сканирования (v)	1-0,5-0,25-0,167-0,125	м/с
Стратегия сканирования	Дваунаправленная XY	-

Наиболее важным полученным результатом является то, что кристаллографическая текстура волокна при увеличении подводимой энергии может получена в виде текстуры куба.

В статье [2] авторы [1] исследовали взаимосвязь между подводимой лазерной энергией, микроструктурой и магнитными свойствами магнитомягких материалов из  $FeSi_{6,9}$ , получаемые путем использования  $SLM$ . Наилучшие магнитные свойства наблюдались у снятых напряжений образцов, обработанных с использованием мощности лазера  $P = 70$  Вт и скорости сканирования  $v = 0,250$  м/с. Хотя определение взаимосвязи между магнитными свойствами и подводимой лазерной энергией усложняется из-за большого количества задействованных металлургических эффектов (включая дефекты, гранулометрический состав и кристаллографическую текстуру), авторы исследования предполагают, что основными факторами являются изменения пористости и кристаллографической текстуры. Относительно небольшой размер зерна, создаваемый процессом  $SLM$ , считается фактором, ограничивающим магнитные характеристики материала, что позволяет предположить, что последующая термообработка для увеличения зерна необходима для практических применений.

Работа [3] является продолжением работ [1-2]. При тех же параметрах печати образцы исследовались с точки зрения влияния отжига на физические и механические характеристики образцов. Результаты показывают, что отжиг при  $1150$  °С в течение 1 часа дает рекристаллизованную микроструктуру, характеризующуюся преимущественно равноосными зёрнами размером до  $300$  мкм. Квазистатические магнитные свойства, достигаемые при отжиге, с максимальной относительной проницаемостью  $24000$  и коэрцитивной силой  $16$  А/м выгодно отличаются от коммерческих примеров высококремнистой стали.

В статье [4] представлен метод твердофазного спекания  $FeSi_6$ . Образцы были отверждены с последующим удалением связующего и спечены в твердом состоянии до высокой плотности без образования трещин. Образцы имели отличные электромагнитные и прочностные характеристики: предел прочности при растяжении  $434$  МПа, электрическое сопротивление  $98$  мкОм/см и намагниченность насыщения  $1,83$  Тл при низкой коэрцитивной силе и высокой проницаемости.

В статье [5] проводился металлографический и магнитный анализ магнитомягких композитов прямого лазерного спекания, а также продемонстрированный разработанный адаптированный дозатор порошка, позволяющий 3D-принтеру *SLM* обрабатывать несколько порошков в одном процессе печати. Авторам удалось добиться производство с помощью двух порошков с хорошими показателями механических свойств. Однако, магнитные свойства изготовленных образцов оказались ниже опубликованных ранее. Авторы интерпретировали это как следствие взаимной диффузии двух материалов.

В статье [6] представлен новый процесс селективного лазерного плавления с формированием оболочки (*SS-SLM*) и демонстрируются высокоплотные (относительная плотность  $> 98\%$ ) структурно-слоистые мягкокомпонентные *FeSi6,5* с поверхностной изоляцией. Высокотемпературная термообработка вызвала рост зерен и резко улучшила магнитные свойства, в том числе коэрцитивную силу 34,6 А/м, проницаемость 7393 и намагниченность насыщения 1,68 Т. Кроме того, процесс на основе золь-геля дал однородный и плотный изоляционный слой  $\text{SiO}_2$  на поверхности оболочки, который эффективно ограничивает вихревые токи только внутри оболочки. Примечательно, что потери в сердечнике 52,5 Вт / кг (при 1 кГц,  $B_m = 1$  Тл) наблюдались при определяемой минимальной толщине листа 0,2 мм.

Все представленные работы отмечают, что аддитивное производство из высококремнистой стали является перспективным направлением, поскольку оно обходит современные ограничения, связанные с другими технологиями производства из порошкового материала. Высококремнистая сталь, изготовленная с применением аддитивных технологий, уже в настоящее время имеет привлекательные физические и механические характеристики, которые со временем будут продолжать изучаться и улучшаться.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garibaldi M. et al. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting //Acta Materialia. – 2016. – Т. 110. – С. 207-216.
2. Garibaldi M. et al. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe-6.9% wt Si soft magnets //Materials Characterization. – 2018. – Т. 143. – С. 144-151.
3. Garibaldi M. et al. Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing //Scripta Materialia. – 2018. – Т. 142. – С. 121-125.
4. Cramer C. L. et al. Binder jet additive manufacturing method to fabricate near net shape crack-free highly dense Fe-6.5 wt.% Si soft magnets //Heliyon. – 2019. – Т. 5. – №. 11. – С. e02804.
5. Kocsis B., Fekete I., Varga L. K. Metallographic and magnetic analysis of direct laser sintered soft magnetic composites //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Т. 501. – С. 166425.
6. Koo B. et al. Structurally-layered soft magnetic Fe-Si components with surface insulation prepared by shell-shaping selective laser melting //Applied Surface Science. – 2021. – С. 149510.

*Пронин Е. А., Нуриева А. М., Лелюх П. Ю., Павленкова А. А., Уразбахтин Р.Р.*  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБМОТКАХ И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

*Аннотация:* Аддитивные технологии получают все больший интерес от мировой промышленности в самых разных областях, в частности, в электромеханике. В современных конструкциях электрических машин с высокочастотной работой необходимо учитывать влияние различных параметров, которые усложняют конструкцию обмотки, а также накладывают определенные ограничения на исполнение обмотки. Аддитивные технологии позволяют обойти эти ограничения, а также обеспечивают свободу исполнения обмотки, что позволяет применять новые конструктивные решения для увеличения эффективности электрических машин. В данной статье представлен обзор использования аддитивных технологий в изготовлении обмоток и электроизоляционных материалах электрических машин.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, обмотки электрических машин, электрические машины, 3D-печать.

### **1. Введение**

Узел обмотки электрической машины состоит из нескольких основных компонентов: электрические проводники, электрическая изоляция и механические крепления. Наиболее распространенными материалами для проводников являются медь и алюминий [1], причем медь является наиболее популярной. Связано это с относительно высокой электропроводностью меди

55,5–58 МСм/м [2]. На проводники обмотки обычно наносится покрытие, которое обеспечивает необходимые электрические, термические и механические свойства, среди которых, например, номинальное напряжение, температурный уровень и устойчивость к механическим воздействиям, среди прочего [3].

Традиционно считается, что высокий коэффициент заполнения паза свидетельствует об эффективной конструкции электрической машины, которая характеризуется низкими потерями. Однако в современных конструкциях высокочастотных электрических машин необходимо учитывать влияние покрытия, близость витков и др. [4]. Это сильно усложняет возможности конструкции обмотки, где ее сечение и размещение в пазах имеют особое значение. Использование аддитивных технологий способно обеспечить новые конструктивные решения электрических машин с улучшенными показателями производительности, использованием новых перспективных материалов и высокой технологичностью по сравнению с обычными методами производства обмоток электрических машин.

## **2. Основная часть**

На рис. 1 (а) представлен пример обмотки, где отдельные витки имеют разное сечение [5]. Подобная конструкция, изготовленная с использованием медного сплава и прямого лазерного спекания металлов (*DMLS*) должна была обеспечить конструкцию с низкими потерями. Однако электрические свойства материала обмотки, изготовленной с помощью аддитивных технологий, оказались значительно хуже, чем у традиционной меди, обычно используемой для изготовления обмоток. Авторы отмечают, что электрическая проводимость составила 51% от традиционной меди, что даже ниже, чем у алюминиевых проводников. Дальнейшая работа тех же авторов показала значительное улучшение электропроводности материала обмоток – 43,5 МСм/м для *CuCr1Zr*, что составляет 75% от традиционной меди [6].

На рис. 1 (б) показаны как компьютерная модель, так и прототип обмотки с витками «переменного» сечения и улучшенной электропроводностью.

Настоящая конструкция обмотки была разработана для интегрированного стартер-генератора [6], [7]. Приведенные выше примеры обмоток, использование дальнейшей постобработки, которое включала покрытие соответствующей электроизоляцией (эмалью) [6].

На рис. 1 (в) показан пример обмотки, который представлен компьютерной моделью и прототипом обмотки. Авторы использовали медный сплав и керамический материал с соответствующим связующим [8]. Подобный подход позволяет формировать сложные геометрические формы. Для достижения запланированных показателей обмотка подверглась термической обработке. Электропроводность изготовленных обмоток оказалась ниже, чем у обычной медной проволоки – 41,9 МС/м (72% от традиционной медной проволоки). Пониженный показатель электропроводности объясняется пористостью материала [8]. В дополнение к этому авторы исследовали тепловое расширение деталей, не обнаружив начального термоциклирования до 300°C.

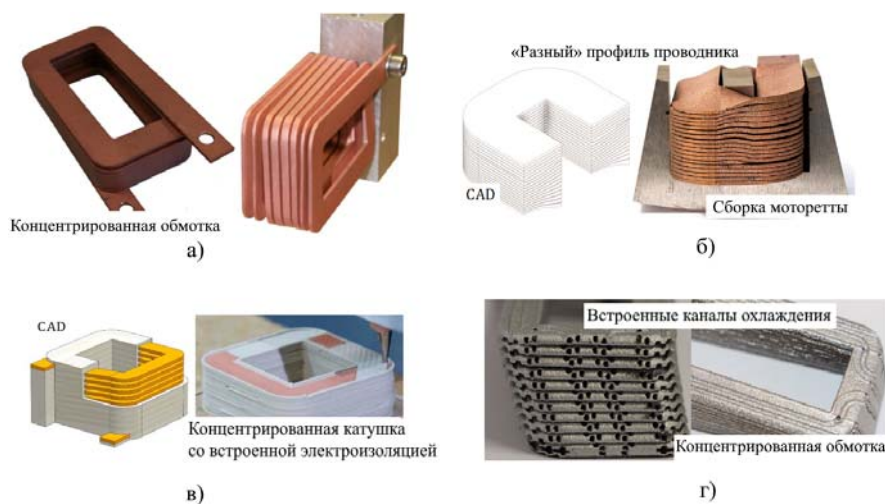


Рис. 1. Электрические обмотки, изготовленные с применением аддитивных технологий:

*а) и б) медная обмотка «разного» сечения для концентрированных обмоток (Бристольский университет [5], [6], в) медная обмотка – мультиматериальная с керамической изоляцией для SRM (Технологический университет Хемница) [8], г) алюминиевая обмотка со встроенными каналами охлаждения (Ганноверский университет Лейбница) [9]*

Интересная концепция концентрированной обмотки со встроенными каналами охлаждения показана на рис. 1 (г). Геометрия обмотки должна была

уменьшить потери мощности при переменном токе в обмотке, а также для высокой способности теплоотвода. Обмотка изготовлена из алюминиевого сплава *AlSi10Mg* [9]. Охлаждающие каналы предназначены для уменьшения общих потерь мощности в обмотке, возникающих при работе переменного тока. Работа продемонстрировала, что предложенный подход позволил осуществить прямой отвод тепла от обмотки с плотностью тока в проводнике  $100 \text{ A/мм}^2$ .

Постобработка материалов для обмоток также важна, как и для других деталей, изготовленных с помощью применения аддитивных технологий. Постобработка позволяет до определенной степени изменять требуемые физические свойства материала. В [10] авторы оценивают различные методы постобработки/термообработки материалов и их влияние на механические и электрические свойства проводников, изготовленных из алюминиевого сплава *AlSi10Mg* (рис. 2).



Рис. 2. Образцы материалов, изготовленные с различной ориентацией сборки из *AlSi10Mg* (Ноттингемский университет) [10]

Экспериментальные данные показывают, что аддитивное производство вносит в изготовленные детали собственную анизотропию материала. Это особенно интересное физическое свойство материала при рассмотрении конструкции обмоток для высокочастотных применений.

### 3. Заключение

Научные публикации показывают, что в настоящее время обмотки, изготовленные с применением аддитивного производства не могут соперничать по значениям электропроводности с традиционной медной проволокой. Однако, возможности, которые открывает аддитивное производство для изготовления обмоток электрических машин, а также современные достигнутые показатели свидетельствуют о том, что изготовление обмоток электрических машин с применением аддитивного производства является перспективным направлением электротехнической промышленности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Влияние выбора медных или алюминиевых обмоток силовых масляных трансформаторов на их массогабаритные параметры //Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения. – 2020. – С. 74-76.
2. ВолгаСпецСталь. Цветной прокат. Алюминий. – URL: <http://www.vss-nn.ru/tsvetnoy-prokat> (дата обращения 01.10.2021г.)
3. Ануши М.И., Афиногенова С.Н., Фатьянов С.О. Сравнительный анализ способов пропитки изоляции обмоток электродвигателей, используемых в производстве сельскохозяйственной продукции //Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. – 2017. – С. 4-12.
4. Jameson N.J., Azarian M.H., Pecht M. Thermal degradation of polyimide insulation and its effect on electromagnetic coil impedance //Proceedings of the Society for Machinery Failure Prevention Technology 2017 Annual Conference. – 2017.
5. Simpson N., Mellor P.H. Additive manufacturing of shaped profile windings for minimal AC loss in gapped inductors //2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). – IEEE, 2017. – С. 1-7.
6. Simpson N. et al. Additive manufacturing of shaped profile windings for minimal AC loss in electrical machines //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 56. – №. 3. – С. 2510-2519.
7. Wrobel R. et al. Design of a brushless PM starter generator for low-cost manufacture and a high-aspect-ratio mechanical space envelope //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Т. 53. – №. 2. – С. 1038-1048.
8. Lorenz F., Rudolph J., Wemer R. Design of 3D printed High Performance Windings for switched reluctance machines //2018 XIII international conference on electrical machines (ICEM). – IEEE, 2018. – С. 2451-2457.
9. Wohlers C. et al. Design and direct liquid cooling of tooth-coil windings //Electrical Engineering. – 2018. – Т. 100. – №. 4. – С. 2299-2308.
10. Silbernagel C. et al. Electrical resistivity of additively manufactured AlSi10Mg for use in electric motors //Additive Manufacturing. – 2018. – Т. 21. – С. 395-403.



Батраева Т. Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ВИБРИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

*Аннотация:* В машиностроении электрохимическая обработка (ЭХО) относится к современным технологическим процессам обработки деталей и заготовок в химических растворах электролитах. Электрохимическая и электрофизическая обработка применяется для изготовления деталей, заточки режущего инструмента, формообразования сложно-профильных деталей, турбинных лопаток, изготовления деталей штампов и пресс – форм, обработки деталей из жаропрочных, хрупких и твердых сплавов и др. Методы электрохимической обработки могут быть различными: электрохимическая размерная обработка, электрохимическое полирование, шлифование, электрохимическая ультразвуковая обработка, анодномеханическая обработка и др. Электрохимическая обработка позволяет решать такие технологически трудные задачи, как обработка высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, хрупких, тонкостенных, нежестких деталей, склонных к образованию трещин в поверхностном слое.

*Ключевые слова:* Электрохимическая обработка, электрод-инструмент, поверхность, точность, шероховатость, вибрация, анод, катод, электролит.

Электрохимические процессы обработки основаны на механизме анодного растворения материала. Это явление, основанное на способности растворения металлов в процессе окислительных реакций в среде электролита (электропроводного раствора) под действием электрического тока во время процесса электролиза. Процесс электролиза проходит между анодом и катодом в межэлектродном промежутке. Растворение металла происходит по первому закону Фарадея, по которому количество растворенного металла, прямо пропорционально силе тока, прошедшего через электролит, определяется по формуле:

$$V = kIt, \quad (1)$$

где  $k$  - электрохимический эквивалент, см<sup>3</sup>/А мин;  $I$  – сила тока, А;  $t$  – время электролиза, мин.

Процесс электролиза сопровождается процессами окисления и восстановления поверхности электродов, которые погружены в раствор электролита и подсоединены к источникам питания. Заготовка (анод) присоединена положительному контакту источника питания. Инструмент электрод (катод) присоединен к отрицательному полюсу источника питания. В

растворах электролитах молекулы вещества распадаются на положительные ионы (катионы) и на отрицательные ионы (анионы). Количество положительных и отрицательных зарядов, переносимых ионами одинаково. В водном растворе электролита NaCl молекулы растворяются на положительные ионы натрия  $\text{Na}^+$  (катионы) и отрицательные ионы хлора  $\text{Cl}^-$  (анионы). Вода распадается на ионы водорода  $\text{H}^+$  (катионы) и гидроксиды  $\text{OH}^-$  (анионы). На рис. 1 представлен процесс электролиза: Электроды погружены в водный раствор электролит, на электроды подается напряжение, начинается движение ионов в электролите. Катионы начинают перемещаться к катоду, а анионы перемещаются к аноду [1].

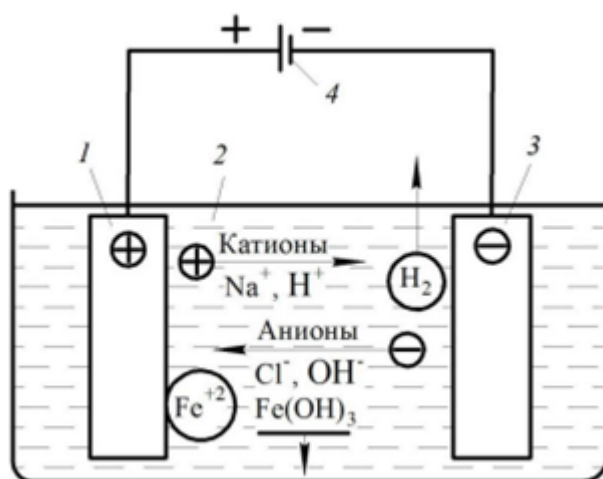


Рис. 1. Схема электролиза

1 - заготовка (анод); 2 - электролит; 3 - электрод - инструмент (катод);  
4 - источник питания

Появление в таких отраслях промышленности как приборостроении, медицине, авиастроении твердых, высокопрочных, нано материалов повышение требований качеству поверхностного слоя и усложнением формы деталей возникла потребность в новых электрофизических и электрохимических методах обработки. Новые требования к качеству поверхности обрабатываемых деталей способствовало появлению нового метода ЭХО с применением вибрирующего электрода – инструмента (ЭИ).

Исследования процесса ЭХО с вибрирующим ЭИ выявили возможность существенного улучшения точности копирования и снижения шероховатости поверхности за счет использования импульсов тока сверхвысокой плотности.

Основными факторами повышения точности являются: локальное повышение электропроводности за счет кратковременного увеличения давления (способствующего кратковременному уменьшению относительного объемного газонаполнения межэлектродной среды) в момент сближения электродов и улучшение прокачки электролита в межэлектродном промежутке в момент отвода ЭИ от заготовки.

Электрохимический процесс осуществляется на сверхмалых межэлектродных зазорах (3...10 мкм) с использованием тока высокой плотности ( $10^2...10^4$  А/см<sup>2</sup>). Что позволяет получить малые погрешности обработки в пределах (0,001...0,005 мм), шероховатость обрабатываемой поверхности в пределах (Ra 0,1...0,01 мкм).

Таким образом, данный метод обеспечивает существенное повышение производительности и точности выполнения как операций электрохимического прошивания различных отверстий, так и копировально-прошивочных операций сложнофасонных поверхностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байсупов И.А. Электрохимическая обработка металлов: Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1981 – 152с., ил.
2. Теория процесса импульсной электрохимической обработки вибрирующим электродом-инструментом: учебное пособие / А.Р. Маннапов, Т.Р. Идрисов, А.Н. Зайцев; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 88 с.

*Лелюх П. Ю., Пронин Е. А.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В ОТРАСЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

*Аннотация:* Снижение производственного травматизма является одной из главных проблем охраны труда в любой сфере промышленности, так как травматизм не только подрывает здоровье работников, но и приносит убытки предприятию и государству. Электроэнергетика – крайне травмоопасная отрасль промышленности, в связи с чем разработка мероприятий по охране труда и снижению рисков в данной сфере всегда будет актуальна. В статье проанализированы причины и предложены методы снижения производственного травматизма на предприятиях электроэнергетики.

*Ключевые слова:* электроэнергетика, производственный травматизм, охрана труда, несчастный случай.

### **1. Введение**

Электроэнергетика, являющаяся одной из важнейших отраслей производства, также является одной из наиболее травмоопасных, так как сопряжена с большими нагрузками, неблагоприятными факторами производственной среды, необходимостью проведения высотных работ и опасностью поражения электрическим током. Снижение риска производственного травматизма, в частности в области электроэнергетики, остается одной из наиболее актуальных проблем охраны труда.

Охрана труда – это система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя комплекс правовых, организационных, технических, профилактических и других мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей [1]. В том числе, в обязанности специалиста по охране труда является учет и расследование несчастных случаев на производстве, а также направление данных в Федеральную службу государственной статистики (Росстат).

### **2. Анализ причин производственного травматизма**

По данным Министерства энергетики Российской Федерации, чаще всего работники, задействованные в отрасли электроэнергетики, получают травмы в результате падения с высоты, поражения электрическим током, воздействия

среды с высокой температурой, а также дорожно-транспортных происшествий. На рис. 1 отображено процентное соотношение видов происшествий и факторов воздействия [2].

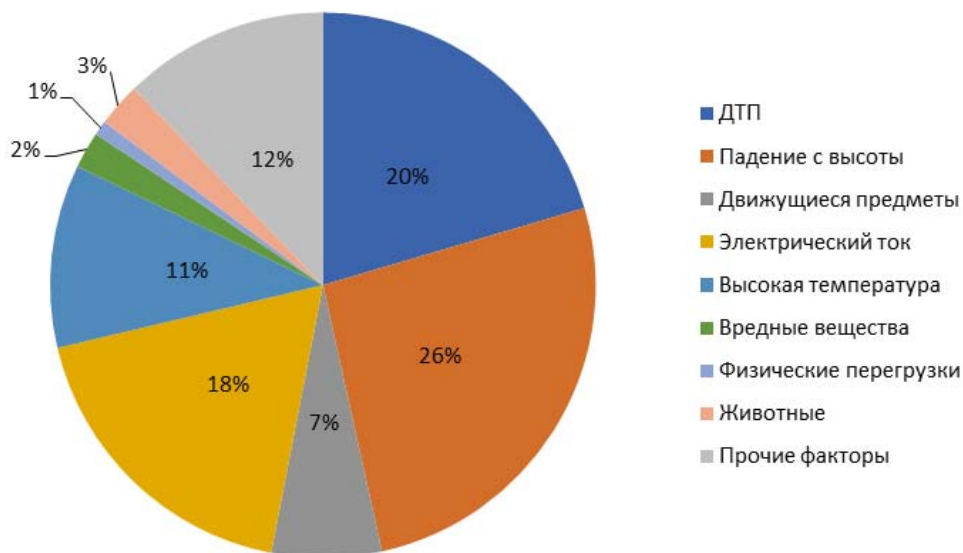


Рис. 1. Процентное соотношение пострадавших по факторам воздействия

Как видно из рис. 1, более четверти (26%) несчастных случаев в отрасли электроэнергетики составляют падения с высоты, что объясняется необходимостью технического обслуживания многокилометровых линий электропередач. Далее (20%) следуют дорожно-транспортные происшествия, составляющие достаточно большую долю несчастных случаев во всех отраслях промышленности, требующих использование работниками транспортных средств. Третью по величине долю (18%) составляют поражения электрическим током, что наиболее специфично для отрасли электроэнергетики. Также значительная часть (11%) травм вызвана воздействием высоких температур поверхностей (например, при работе с трансформаторами и другим оборудованием, которому свойственно нагреваться).

Основными причинами несчастных случаев и травматизма по данным Минэнерго являются неудовлетворительная организация проведения работ, нарушение технологических процессов, личная неосторожность пострадавших, нарушение работниками требований охраны труда и техники безопасности, а

также неправильное применение или отказ от применения средств индивидуальной защиты и ношения спецодежды. Все это указывает на слабую систему управления охраной труда в отрасли электроэнергетики и пренебрежение работниками правилами техники безопасности. Следует также отметить, что условия труда на многих предприятиях не соответствуют требованиям современных норм, что увеличивает вероятность производственного травматизма.

Рассмотрим сведения Минэнерго о пострадавших по стажу работы в профессии (рис. 2) [2].

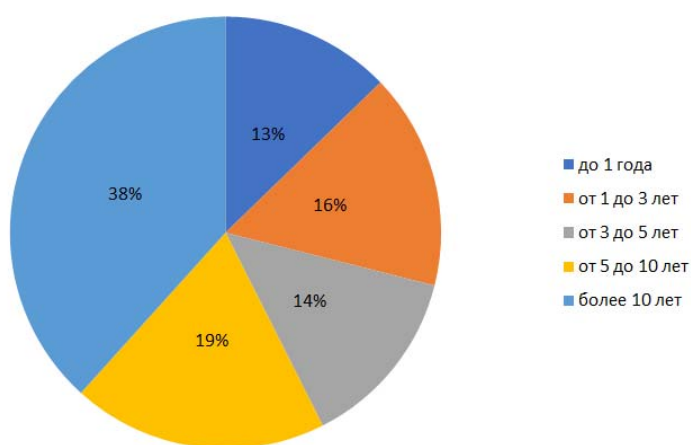


Рис.2. Стаж работы пострадавших в отрасли электроэнергетики

Как видно из рис. 2, значительную часть пострадавших составляют работники со стажем свыше 10 лет. Наименьшее число пострадавших наблюдается среди работников со стажем менее одного года.

Существует гипотеза, что рост стажа работы по специальности оказывает положительное влияние на безопасность труда, так как работник повышает свою профессиональную компетентность, тем самым снижая для себя риск травматизма. Тем не менее, согласно статистике, вне зависимости от отрасли производства, на практике происходит ровно наоборот. В работе [3] проанализировано количество пострадавших на производстве в железнодорожной отрасли с учетом их стажа, а также рассчитаны коэффициенты частоты производственного травматизма. Исследование показало, что среди работников со стажем свыше 10 лет не только самое

большое количество травм, но также и наибольшее количество несчастных случаев с тяжелым исходом.

Такой результат может объясняться тем, что работники с большим стажем, считая себя профессионалами, со временем утрачивают бдительность и внимательность, начинают пренебрегать техникой безопасности и излишне расслабляются. Подобная халатность в большинстве случаев и является причиной несчастного случая. Работники же с небольшим стажем, не привыкшие к опасным условиям труда, зачастую уделяют больше внимания нормам и правилам безопасности.

### **3. Методы снижения производственного травматизма**

Проанализируем данные Росстата за последние 10 лет [4], чтобы выяснить эффективность мероприятий по охране труда в области электроэнергетики.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что за рассматриваемый период численность пострадавших в расчете на 1000 работающих снизилась более чем в два раза, в то время как расход средств на мероприятия по охране труда в отрасли электроэнергетики возрос в 2,6 раза. Следовательно, данные мероприятия являются эффективными для снижения производственного травматизма и дальнейшая работа в этом направлении весьма целесообразна.

В первую очередь для наиболее эффективного снижения производственных рисков на предприятии, вне зависимости от его размера, должна быть внедрена система управления охраной труда (СУОТ). СУОТ – это по своей сути ежедневная деятельность работодателя, направленная на безопасность работников и снижения опасностей на производстве. Внедрение СУОТ начинается с предварительной оценки состояния охраны труда на конкретном предприятии, выявления ее сильных и слабых сторон и обозначения недостающих элементов. Далее компетентный специалист разрабатывает план внедрения СУОТ, опираясь на данные анализа. В него

должны входить организационная структура предприятия, цели и задачи, а также программы по обеспечению охраны труда [5].

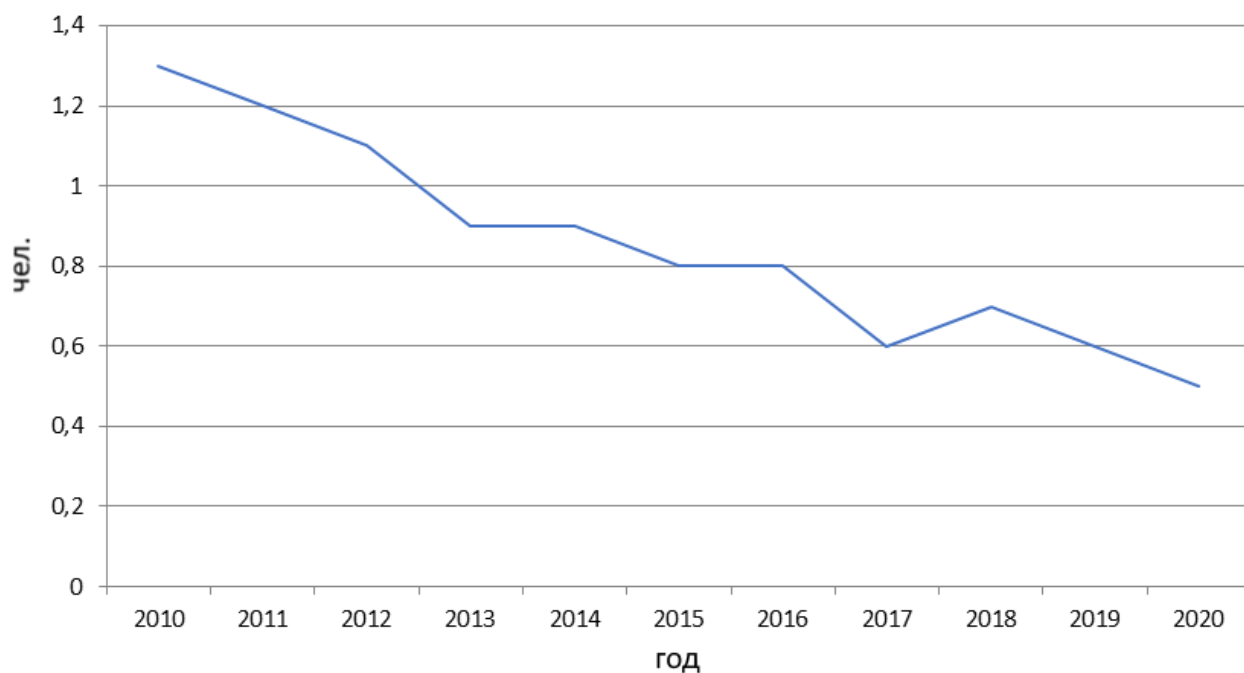


Рис. 3. Численность пострадавших в отрасли электроэнергетики в расчете на 1000 работающих за период 2010-2020 г.г.

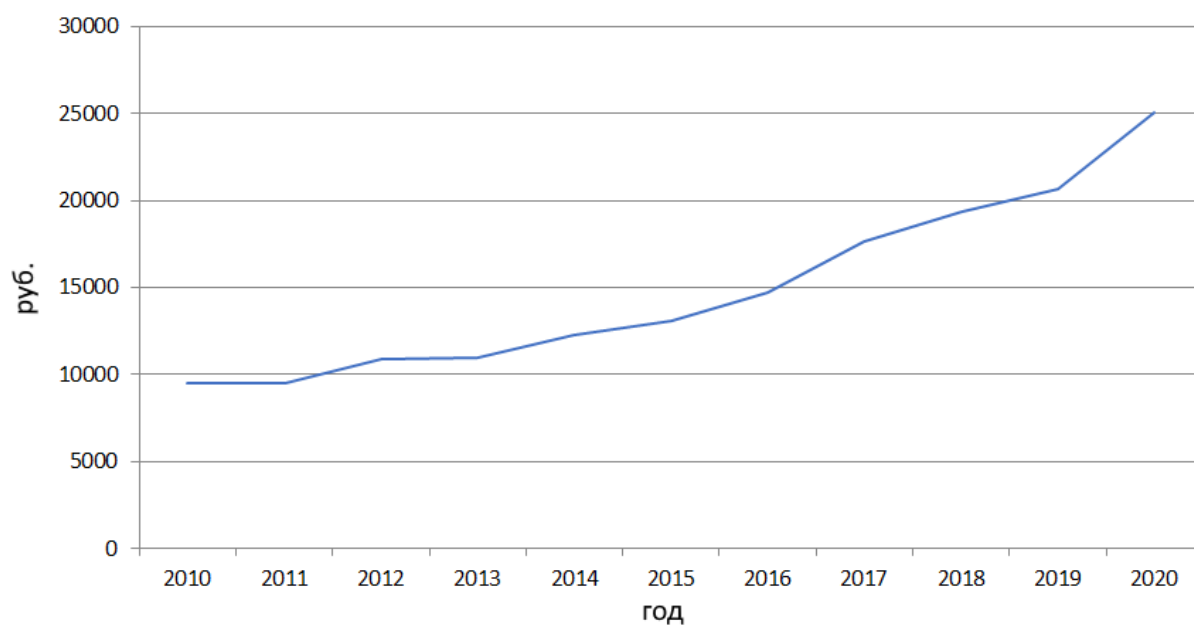


Рис. 4. Расход средств на мероприятия по охране труда в области электроэнергетики в расчете на одного работающего за период 2010-2020 г.г.

Следующий шаг по снижению производственного травматизма – это непосредственное обеспечение безопасности рабочих мест и повышение



трудовой дисциплины. Сюда входит своевременная проверка исправности оборудования, спецоценка условий труда, систематический инструктаж и аттестация работников в области безопасности и охраны труда. Кроме того, важно обеспечивать соблюдение режима труда и предоставлять работникам места для полноценного отдыха, так как переутомление является частой причиной несчастных случаев [6].

Так как самой частой причиной травматизма в сфере электроэнергетики является падение с высоты, необходимо обратить особое внимание на условия проведения высотных работ. К таким работам может допускаться только персонал, имеющий необходимую подготовку, и при наличии наряда-допуска. Также должно регулярно проверяться состояние подъемных сооружений, ограждений, перил и лестниц, страховочных тросов. Использование оборудования в ненадлежащем состоянии не допускается.

Для снижения вероятности поражения работников электрическим током и воздействия высоких температур необходим контроль использования средств индивидуальной защиты, а также регулярная проверка их исправности и своевременная замена СИЗ с истекшим сроком службы.

Также крайне важно повышать культуру охраны труда среди работников. Для этого необходимо постоянное обучение работников охране труда и безопасным методам работы, периодическая проверка знаний, проведение плановых и вводных инструктажей, пропаганда в области охраны труда, нематериальное поощрение безопасного поведения работников.

#### **4. Выводы**

Были проанализированы статистические данные Министерства энергетики РФ и Федеральной службы государственной статистики о производственном травматизме в области электроэнергетики. Выявлены основные причины несчастных случаев и травматизма, к которым в первую очередь относится нарушение норм и правил охраны труда. Проведен анализ зависимости количества пострадавших в данной отрасли от количества средств,

затрачиваемых на мероприятия по охране труда. Подтверждена эффективность данных мероприятий и предложены меры для дальнейшего снижения производственного травматизма.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статья 209. Основные понятия // Трудовой кодекс Российской Федерации. — Москва, 2020.
2. Информационно-аналитическая справка по травматизму // Министерство энергетики РФ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/272>, дата обращения: 01.09.2021г.
3. Дементьева Ю.В. Влияние стажа работы на производственный травматизм // Мир транспорта. – 2015. - т.13. - №1. – С. 198-204.
4. Сведения о травматизме на производстве и профессиональных заболеваниях // Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://rosstat.gov.ru/working\\_conditions](https://rosstat.gov.ru/working_conditions), дата обращения: 01.09.2021г.
5. Бардакова М. Элементы системы: цели, задачи и процедуры СУОТ / Марина Бардакова // Охрана труда и безопасность предприятия. – 2021. – 17 дек. – С. 2.
6. Матушанский Г.У., Завада Г.З. Роль человеческого фактора в предотвращении травматизма на предприятиях энергосистемы // Проблемы энергетики. – 2015. - №3.

*Нуриева А. М., Пронин Е. А., Павленкова А. А., Лелюх П. Ю.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ОБЗОР НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

*Аннотация:* В этой статье представлен обзор неисправностей синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ). Описаны причины возникновения электрических, механических, магнитных и других неисправностей.

*Ключевые слова:* синхронная машина с постоянными магнитами, электрическая неисправность, механическая неисправность, магнитная неисправность.

### **1. Введение**

На сегодняшний день синхронные машины с постоянными магнитами являются наиболее перспективными электрическими машинами. Отсутствие обмотки возбуждения на роторе, повышенный КПД, улучшенные условия охлаждения, лучшие массогабаритные и удельные показатели [1] – эти качества выделяют его из ряда всех остальных электрических машин и обеспечивают ему применение в таких областях, как производственные системы, электромобили, ветряные генераторы, судовые двигатели и т.д. [2]. Поэтому

определение неисправностей является важным моментом для безопасной работы системы, где применяются такие ЭМ.

## 2. Неисправности СМПМ

В процессе жизненного цикла СМПМ могут возникать различные неисправности, которые серьезно влияют на надежность и безопасность его работы. На рисунке 1 приведена классификация неисправностей, возникающих в СМПМ [3].

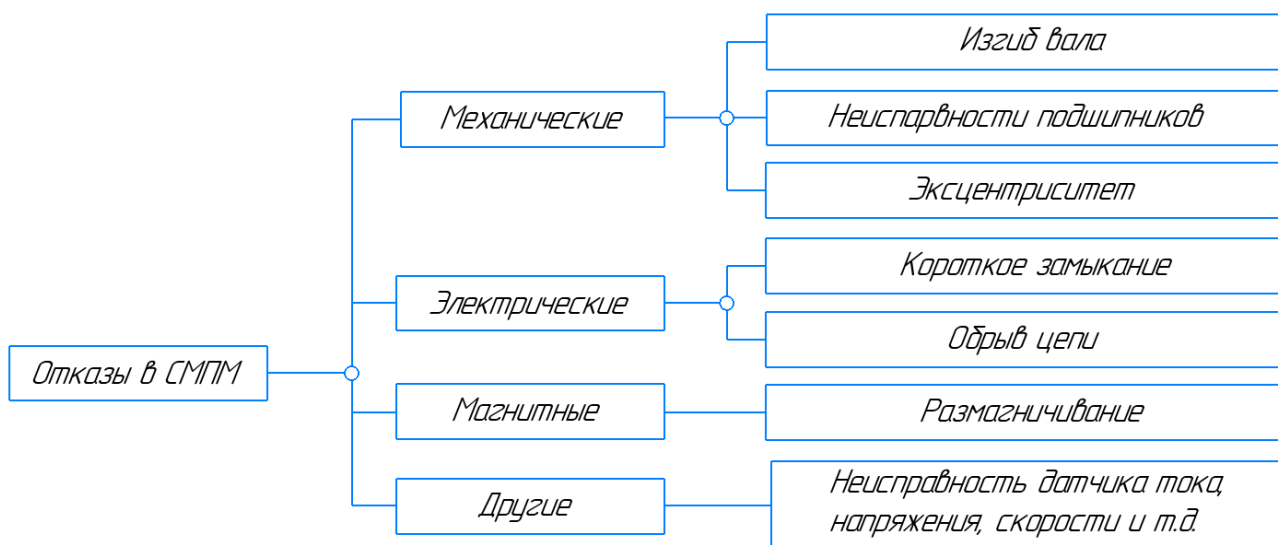


Рис. 1. Классификация неисправностей в СМПМ [3]

### 2.1. Электрические неисправности

В работе [4], установлено, что более 90% неисправностей в СМПМ связано с электрическими неисправностями, которые могут возникнуть из-за обрыва цепи, короткого замыкания обмоток, нарушения изоляции и т. д.

Стоит отметить, что неисправности статора составляют 38% всех неисправностей ЭМ [5], среди которых межвитковое короткое замыкание является наиболее распространенной причиной отказа СМПМ [6, 7]. Наличие таких неисправностей в ЭМ приводит к чрезмерному нагреву основных его узлов [8]. Важно вовремя обнаружить и устранить данную причину, поскольку оно может перейти к межфазному замыканию, замыканию фазы на землю и выходу из строя всей системы [9].

## **2.2. Механические неисправности**

Механические неисправности в основном связаны с изгибом вала, ослаблением болтов, неисправностями подшипников и эксцентриситетом воздушного зазора.

Неисправности подшипников составляют почти 40-50% всех неисправностей ЭМ [10]. Причиной их возникновения служат механические вибрации, несоосность вала, плохая смазка, перегрузки, коррозии и т.д. Стоит отметить, что подшипникам свойственно изнашивание даже при нормальной эксплуатации [11].

Также повреждение подшипников может привести к эксцентриситету – несоответствующему воздушному зазору между ротором и статором. Выделяют два вида эксцентриситета: статический, обусловленный смещением оси вращения ротора относительно оси расточки статора, и динамический, обусловленный биением ротора. В реальной ситуации эти два явления часто сосуществуют, что приводит к смешанной эксцентricности. Эксплуатация ЭМ с таким видом дефекта не приводит к немедленному выходу его из строя, но снижает надежность его работы, долговечность и другие технико-экономические показатели. Самым опасным случаем считается трение между статором и ротором [12], [13].

## **2.3 Магнитные неисправности**

Устройства с постоянными магнитами имеют одну важную технологическую особенность, связанную с возникновением риска выхода их из строя из-за локального размагничивания магнитов. Причины размагничивания могут быть следующими: бросок тока в обмотке, перегрев, механические воздействия. Наличие хотя бы одного из перечисленных факторов может привести к частичной или полной утрате свойств постоянными магнитами, к потере мощности и даже к отказу электрической машины [14].

## **2.4 Другие неисправности**

Применение различных датчиков в ЭМ является повсеместным решением, обеспечивающим контроль и качество изделия. В современном

оборудовании контролируется широкий ряд параметров: температура в различных составляющих оборудования, ток, напряжение, скорость и многое другое.

Одна из причин неисправной работы СМПСМ может быть связана как раз таки с полупроводниковыми устройствами [15]. К примеру, система привода может быть отключена из-за мгновенной перегрузки по току, вызванной неисправностями датчика положения ротора (датчик Холла). Этот тип неисправности может возникнуть на высокой скорости или в условиях большой нагрузки в контроллерах.

### **Заключение**

В данной работе перечислены основные неисправности, которые возникают в ходе эксплуатации синхронных машин с постоянными магнитами. Заблаговременное определение причин, из-за которых происходит выход из строя СМПСМ, позволит повысить надежность всей приводной системы и уменьшить количество отказов в рассмотренных ЭМ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Marcic, T.; Stumberger, B.; Stumberger, G.; Hadziselimovic, M.; Virtic, P.; Dolinar, D. Line-Starting Threeand Single-Phase Interior Permanent Magnet Synchronous Motors—Direct Comparison to Induction Motors. *IEEE Trans. Magn.* **2008**, 44, 4413–4416.
2. Цыбульский П. С. Области применения синхронных двигателей с постоянными магнитами. – 2021.
3. Bhuiyan E. A. et al. A survey on fault diagnosis and fault tolerant methodologies for permanent magnet synchronous machines //International Journal of Automation and Computing. – 2020. – С. 1-25.
4. G. H. B. Foo, X. A. Zhang, D. M. Vilathgamuwa. A sensor fault detection and isolation method in interior permanent-magnet synchronous motor drives based on an extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.60, no.8, pp.3485–3495, 2013. DOI: 10.1109/TIE.2013.2244537.
5. Moosavi, S.S.; Esmaili, Q.; Djerdir, A.; Amirat, Y.A. Inter-Turn Fault Detection in Stator Winding of PMSM Using Wavelet Transform. In Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Belfort, France, 11–14 December 2017; pp. 1–5.
6. Mazzoletti, M.A.; Bossio, G.R.; De Angelo, C.H.; Espinoza-Trejo, D.R. A Model-Based Strategy for Interturn Short-Circuit Fault Diagnosis in PMSM. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2017**, 64, 7218–7228.
7. Cira, F.; Arkan, M.; Gumus, B.; Goktas, T. Analysis of stator inter-turn short-circuit fault signatures for inverter-fed permanent magnet synchronous motors. In Proceedings of the

- IECON 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, Italy, 24–27 October 2016; pp. 1453–1457.
8. Liang, Y. Diagnosis of inter-turn short-circuit stator winding fault in PMSM based on stator current and noise. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Busan, South Korea, 26 February–1 March 2014; pp. 138–142.
  9. Hang, J.; Zhang, J.; Cheng, M. Detection and Discrimination of Open Phase Fault in Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System. IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, 4697–4709.
  10. Zhongming, Y.; Bin, W. A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis. In Proceedings of the IPEMC Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435), Beijing, China, 15–18 August 2000; pp. 1353–1358.
  11. Rosero, J.A.; Cusido, J.; Garcia, A.; Ortega, J.A.; Romeral, L. Broken Bearings and Eccentricity Fault Detection for a Permanent Magnet Synchronous Motor. In Proceedings of the IECON 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, France, 7–10 November 2006; pp. 964–969.
  12. Karami, M.; Mariun, N.; Mehrjou, M.R.; Ab Kadir, M.Z.A.; Misron, N.; Mohd Radzi, M.A. Diagnosis of static eccentricity fault in line start permanent magnet synchronous motor. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kuching, Malaysia, 1–3 December 2014; pp. 83–86.
  13. Ebrahimi, B.M.; Javan Roshtkhari, M.; Faiz, J.; Khatami, S.V. Advanced Eccentricity Fault Recognition in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Stator Current Signature Analysis. IEEE Trans. Ind. Electron. 2014, 61, 2041–2052.
  14. Yang Y. et al. Thermal management of electric machines // IET Electrical Systems in Transportation. – 2017. – Т. 7. – №. 2. – С. 104–116.
  15. S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, Y. Takeda. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.38, no.4, pp.1054–1061, 2002. DOI: 10.1109/TIA.2002.800777.

*Лелюх П. Ю., Пронин Е. А., Павленкова А. А., Нуриева А. М.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Аннотация:* При определенных уровнях электромагнитное излучение может негативно влиять на организм человека и работу электроприборов. Работники электроэнергетической отрасли постоянно подвергаются воздействию электромагнитного излучения, что может провоцировать возникновение профессиональных заболеваний. В данной статье рассмотрены санитарно-гигиенические требования касательно электромагнитного излучения и основные методы снижения его воздействия.

*Ключевые слова:* электромагнитное излучение, электромагнитная безопасность, профессиональные заболевания, охрана труда.

### **1. Введение**

Под воздействием электромагнитного излучения в крови, являющейся электролитом, могут возникать ионные токи, вызывающие нагрев тканей, что особенно опасно для органов со слабо развитой сосудистой системой (глаза,

желудок). Кроме того, электромагнитное излучение негативно влияет на нервную, эндокринную, мочеполовую системы, а также обмен веществ. Незначительное повышение температуры, вызванное маломощным излучением, не оказывает значительного влияния на организм [1], однако с увеличением интенсивности и времени воздействия негативное влияние может значительно возрастать [2]. Таким образом, в зоне риска оказываются люди, в профессиональные обязанности которых входит длительный контакт с электромагнитным излучением.

## **2. Контроль за электромагнитной безопасностью**

Электромагнитной безопасностью называется система знаний, посвященная потенциальному вреду электромагнитного излучения и методам его снижения.

Для обеспечения безопасности персонала на рабочих местах должны соблюдаться санитарно-гигиенические нормы, касающиеся электромагнитного излучения. Нормируется в первую очередь время пребывания человека в зоне воздействия излучения в зависимости от напряженности электрического поля. Так, предельно допустимый уровень напряженности ЭП на рабочем месте (пребывание в зоне в течение всего рабочего дня) составляет 5 кВ/м. При напряженности от 5 до 20 кВ/м допустимое время пребывания в зоне облучения определяется по формуле 1.

$$T = \frac{50}{E} - 2, ч \quad (1)$$

При напряженности ЭП от 20 до 25 кВ/м время пребывания в области воздействия не должно превышать 10 минут. При напряженности свыше 25 кВ/м пребывание в зоне воздействия без применения средств индивидуальной защиты не допускается [3].

На предприятиях контроль за электромагнитной безопасностью осуществляется службой охраны труда. К ее основным обязанностям относятся нормирование и контроль времени пребывания персонала в областях воздействия электромагнитного излучения, проведение инструктажей по технике безопасности и проверка усвоенных знаний, организация своевременного прохождения персоналом медосмотров с целью выявления возможных профессиональных заболеваний, которые в частности могут быть вызваны воздействием электромагнитного излучения.

### **3. Методы защиты от электромагнитного излучения**

Основные методы защиты персонала от воздействия электромагнитного излучения включают организационные и инженерно-технические мероприятия. К организационным мероприятиям относятся:

- Защита временем – ограничение времени пребывания человека в области воздействия. Применяется при невозможности снижения интенсивности излучения до оптимальных значений.

- Защита расстоянием – удаление источника электромагнитного излучения на безопасное расстояние. Применяется при невозможности снижения интенсивности излучения и сокращения времени воздействия [4].

- Применение средств индивидуальной защиты – экранирующей одежды, головных уборов, козырьков.

- Лечебно-профилактические мероприятия, осуществляемые в целях предупреждения возникновения профессиональных заболеваний, их ранней диагностики и лечения. Включают в себя предварительные и периодические медосмотры, санаторно-курортное лечение, устройство медицинских пунктов на предприятии.

К инженерно-техническим мероприятиям относятся:

- рациональное размещение оборудования;
- обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем излучения;



- снижение мощности излучения оборудования за счет применения специальных устройств;
- экранирование источника излучения или объекта защиты [5].

Экранирование позволяет снизить воздействие электромагнитного излучения на людей и технику путем его поглощения или отражения. Отражающие экраны изготавливаются из материалов с низким электросопротивлением – меди, латуни, стали. Наибольшая эффективность отражающих экранов достигается при изготовлении их в виде мелкоячеистой проволочной сетки или тонкой фольги. Защитные свойства таких экранов заключаются в частичном поглощении и многократном отражении электромагнитной волны от стенок экрана, что приводит к потерям энергии и ослаблению ее действия [6]. Такие экраны должны быть заземлены для стекания образующихся в них зарядов.

Помимо сеток для экранирования могут применяться специальные ткани и пленки с металлизированным покрытием, а также краски на основе коллоидного серебра, порошкового графита, сажи. Главное преимущество таких красок заключается в простоте нанесения практически на любую поверхность.

Поглощающие экраны выполняются из таких материалов, как пенопласт, резина, поролон, волокнистая древесина. Отраженная мощность излучения от таких экранов составляет не более 4% [7].

Оценка эффективности экранирования выражается отношением значений напряженности ЭП при отсутствии и наличии экрана.

#### **4. Выводы**

Защита людей от воздействия электромагнитного излучения крайне важна, так как при длительном облучении возможно развитие профессиональных заболеваний. Рассмотрены основные организационные и инженерно-технические мероприятия, направленные на защиту персонала от

воздействия электромагнитного излучения, а также санитарно-гигиенические нормы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wood A., Mate R., Karipidis K. Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimetre waves //Journal of exposure science & environmental epidemiology. – 2021. – С. 1-8.
2. Беляков Г.И. Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда. - Тверь: Тверская ГСХА, 2012. – 462 с.
3. Каракеян В.И. Безопасность жизнедеятельности: учебник для академического бакалавриата / В.И. Каракеян, И.М. Никулина. – М.: Изд-во Юрайт, 2014. – 456 с.
4. Каракеян В.И. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. – М.: Изд-во Высшее образование, 2009. – 138 с.
5. Богуш В.А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский. – М.: Изд-во Бестпринт, 2003. – 406 с.
6. Островский О. С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О. С. Островский, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Фізична інженерія поверхні. - 2003. - Т. 1, № 2. - С. 161-173.
7. Никифоров Л.Л. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / Л.Л. Никифоров, В.В. Персиянов. – М.: Дашков и К, 2019. – 494 с.

*Павленкова А. А., Пронин Е. А., Нуриева А. М., Лелюх П. Ю.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

*Аннотация:* Синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) широко используются благодаря их высокому КПД, большой прочности, надежности и малой инерции крутящего момента. Несмотря на их широкое применение, они могут быть весьма неустойчивыми в работе, когда возникают неисправности в устройствах привода двигателя, таких как инверторы, статоры, обмотки, датчики и т. д. Это может привести к нарушению изоляции, колебаниям крутящего момента, перегрузке по току или даже к выходу системы из строя. В связи с этим для повышения стабильности и надежности СМПМ используются методы диагностики отказов. В этой статье рассматриваются методы диагностики СМПМ на основе моделей.

*Ключевые слова:* диагностика неисправностей синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ), устойчивость, датчик наблюдения, отказы.

### **1. Введение**

Неисправности установки вызваны отклонениями параметров от нормального состояния и определяются с помощью диагностики неисправностей. Определение неисправностей является главной задачей

диагностики. Алгоритмы, используемые для обнаружения неисправностей, определяют отклонения поведения системы от теоретических значений системы, используя ее модель. В ходе этого процесса также определяется время обнаружения. Когда данные о неисправности получены, можно выполнить ее изоляцию и оценку. При обособлении неисправности обозначается тот компонент, в котором возникает неисправность. На этом этапе выявляется фактическое местонахождение неисправностей. Заключительный шаг определяет характеристику неисправности и оценивает величину повреждений.

Одними из методов определения неисправности являются методы, основанные на моделях. В данной статье рассматриваются методы диагностики неисправностей СМПИМ, основанные на моделях.

## **2. Методы диагностики неисправностей на основе моделей**

### **2.1 Общее описание методов на основе моделей**

Метод диагностики неисправностей на основе моделей ввел Р.В. Бирд в 1971 году [1]. При использовании этого метода необходимо наличие определенной модели системы, которую можно получить с помощью математических уравнений и физических составляющих или с помощью методов, основанных на данных. Алгоритмы контролируют отношение входных и выходных данных системы в зависимости от ее модели. Процесс диагностики неисправности на основе модели выполняется в два этапа: остаточная генерация и оценка. Обычно сигнал создается с помощью входных и выходных вычислений системы, а затем оценивается на наличие ошибок. Базовая схема модельной диагностики представлена на рис. 1.

Модели могут быть детерминированными или стохастическими системами с непрерывными переменными, дискретно-событийными системами, распределенными системами или гибридными системами.

Модели систем с непрерывными переменными представляют собой наборы дифференциальных уравнений. Когда используются случайные входные данные, эти системы являются стохастическими, а когда случайность

отсутствует, они являются детерминированными. Для диагностики стохастических и детерминированных моделей используется базовая схема метода на основе моделей, показанная на рис. 1. В безотказных системах с непрерывным регулированием номинальное значение невязки равно нулю или близко к нулю. Если произошла ошибка, величина невязки отклоняется от нуля. Задача оценочной части состоит в том, чтобы определить величину и характер остатка, изменяющегося от нулевого до ненулевого значения.

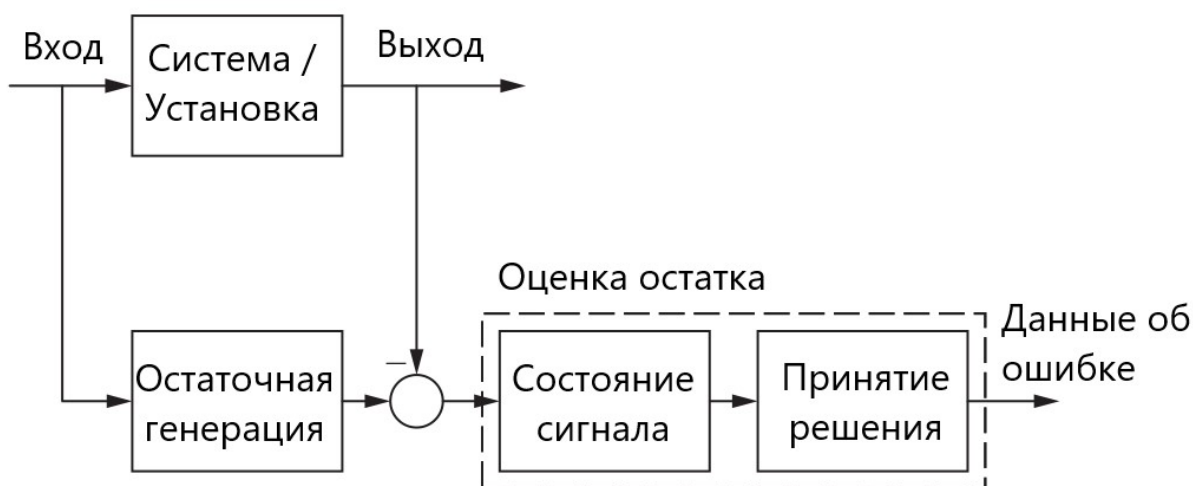


Рис. 1. Базовая схема модельной диагностики

Для дискретно-событийных систем модели описываются входными и выходными данными, которые непрерывно изменяются. Диагностика неисправности этих моделей определяет, возникла ли неисправность или нет, анализируя наблюдаемую дискретную последовательность событий [2].

## 2.2 Режим наблюдения

В системах с переменной структурой за счет нелинейного сочетания различных линейных структур удастся организовать специфическое вырожденное движение – скользящий режим, или режим перехода от движения, соответствующего одной линейной структуре, к движению, соответствующему другой линейной структуре, с помощью логического переключения связей в системе в зависимости от ее фазового состояния. Такой переход осуществляется с высокой частотой, в пределе стремящейся к

бесконечности. После возникновения скользящего режима движение системы происходит вдоль границы переключения и становится независимым от параметров управляемого объекта. Если параметры объекта изменяются в процессе функционирования системы, то такие изменения не оказывают влияния на динамические свойства системы с переменной структурой, находящейся в скользящем режиме. Следовательно, организовав в системе с переменной структурой скользящий режим, удастся добиться независимости ее движения от параметрических возмущений.

Метод, предложенный в [3], описывает датчик наблюдения с адаптивным порогом обнаружения неисправности положения ротора. Поскольку датчик наблюдения связан с неопределенностями модели и изменением параметров, имеют место различные пропуски и ложные тревоги.

Адаптивный порог используется для проверки ошибок и оценки их положения назначенным датчиком наблюдения, где устройство оценки положения генерирует данные о положении ротора посредством датчика наблюдения Люенбергера, а неисправности обнаруживаются путем принятия решения в соответствии с входной частотой и амплитудой, когда невязка становится больше порогового значения. Также возникает ошибка фазового сдвига, которая допустима при использовании алгоритма компенсации.

Другой датчик наблюдения предложен в [4]. В его основе заложены форм-фактор тока и адаптивный порог, который рассчитывается на основе измеренных токов двигателя и расчетных токов двигателя. Датчик наблюдения Люенбергера также используется для оценки трехфазных токов двигателя. Сначала рассчитываются два форм-фактора тока для каждой фазы в соответствии с измерением и оценкой. Затем из них генерируются три остатка для каждой фазы, и адаптивные пороги вводятся в действие на основе полученных остатков. С этого момента неисправности обнаруживаются путем сравнения каждого остатка с соответствующим адаптивным порогом. Обнаруженные неисправности обрыва цепи и неисправности датчиков тока дифференцируются по суммам токов и выделяются по средним значениям тока.

Метод, описанный в [5], основан на расширенной динамической модели в стационарной системе отсчета для обнаружения межвитковых коротких замыканий в фазных обмотках синхронного двигателя с постоянными магнитами. Схема межвиткового короткого замыкания показана на рис. 2. Она выполняется с сигналом вектора дифференциального тока, который находится из разности между измеренным и оцененным токами статора.

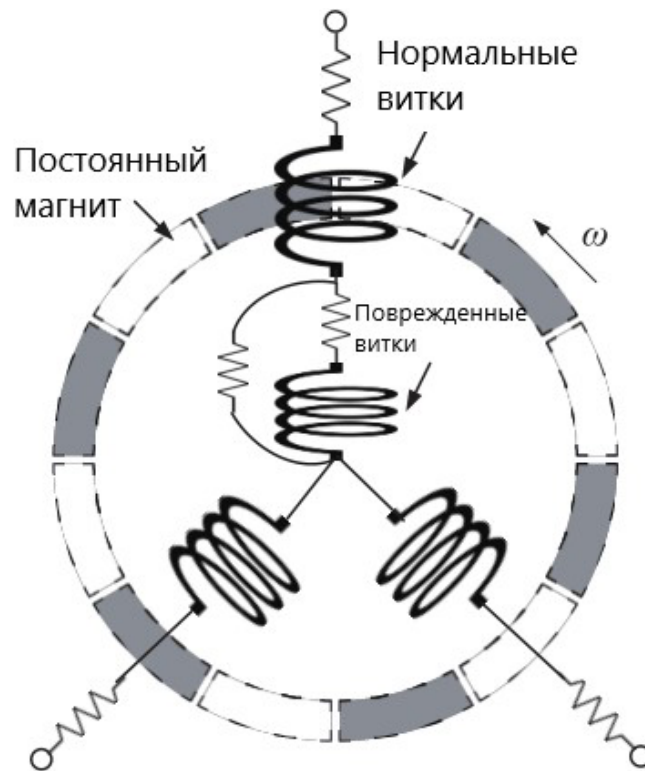


Рис. 2. Схема межвитковых коротких замыканий в фазной обмотке синхронного двигателя с постоянными магнитами

Было предложено наблюдать за состоянием для оценки токов статора на основе номинального режима работы.

Модель в qd-координатах токи статора можно выразить как:

$$I'_{qd} = I_{qd} - \frac{2}{3} \beta_{qd} I_f \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{I}'_{qd} = \frac{1}{L} (V_{qd} - R_s \hat{I}'_{qd} - \Phi_{pm} \omega_e \hat{E}_{qd}), \quad (2)$$

где  $I_d$  и  $I_f$  – векторы токов статора и замыкания,  $\beta_{qd}$  – векторный коэффициент замыкания,  $L$  – индуктивность рассеяния обмотки статора,  $V_{qd}$  – вектор напряжения статора,  $\Phi_{pm}$  – амплитуда потока постоянного магнита,  $\omega_e$  – угловая

электрическая скорость,  $\hat{E}_{qd}$  – ЭДС, рассчитываемая по угловой электрической скорости.

### 2.3 Оценка параметров

При оценке параметры системы определяются в режиме онлайн с помощью алгоритмов и сравниваются с эталонными параметрами, полученными в начальных условиях. В [6] используется оценка ЭДС, основанная на физике разомкнутого контура и схеме отслеживания текущего состояния системы. Обнаружение межвитковых замыканий осуществляется на основе разности между расчетной противо-ЭДС и эталонной противо-ЭДС, где эталонная противо-ЭДС в первую очередь рассчитывается методом конечных элементов или фактическим измерением системы, находящейся под напряжением в нормальных условиях. Оценка ЭДС включает нелинейности системы, когда не происходило никаких неисправностей. При возникновении какой-либо неисправности расчетная ЭДС противоречит эталонной ЭДС, которая может быть определена индивидуально для каждой из фаз как:

$$E_{diff} = EMF_{ref} - EMF_{est}. \quad (3)$$

### 2.4 Анализ методом конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод, который можно использовать для определения параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами, включая распределение электромагнитного поля, крутящие моменты, потокосцепление, плотность потока и индуктивность, используя геометрические пропорции и свойства веществ. Оценка и проверка этого типа параметров приводит к обнаружению неисправности. Предложенная в [7] схема включает в себя определение места межвиткового повреждения и направления повреждения эксцентриситета, где короткие витки обмотки якоря, эксцентриситет и размагничивание при переменных нагрузках проверяются методом МКЭ. В [8] трехфазный синхронный двигатель с постоянными

магнитами при межвитковом коротком замыкании оценивается методом МКЭ с временным шагом. Пошаговый МКЭ также применяется в [9] для синхронного двигателя с постоянными магнитами в условиях статического эксцентриситета.

### 3. Вывод

Диагностика неисправностей в электрических машинах, в том числе в СМПМ, является важным этапом в эксплуатации электрических машин, которая обеспечивает их надежную работу. В данной статье представлены методы диагностики неисправностей СМПМ, основанные на моделях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.V. Beard. Failure accomodation in linear systems through self-reorganization, Ph. D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1971.
2. L. K. Carvalho, M. V. Moreira, J. C. Basilio, S. Lafortune. Robust diagnosis of discrete-event systems against permanent loss of observations. *Automatica*, vol.49, no.1, pp.223–231, 2013.
3. C. Choi, K. Lee, W. Lee. Observer-based phase-shift fault detection using adaptive threshold for rotor position sensor of permanent-magnet synchronous machine drives in electromechanical brake. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* , vol. 62, no. 3, pp. 1964–1974, 2015.
4. I. Jlassi, J.O. Estima, S.K. El Khil, N.M. Bellaaj, A.J.M. Cardoso. A robust observer-based method for IGBTs and current sensors fault diagnosis in voltage-source inverters of PMSM drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2894–2905, 2017.
5. M.A. Mazzoletti, G.R. Bossio, C.H. De Angelo, D.R. Espinoza-Trejo. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 7218–7228, 2017.
6. A. Sarikhani, O. A. Mohammed. Interturn fault detection in PM synchronous machines by physics-based back electromotive force estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3472–3484, 2013.
7. Y. Da, X. D. Shi, M. Krishnamurthy. A new approach to fault diagnostics for permanent magnet synchronous machines using electromagnetic signature analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 4104–4112, 2013.
8. B. M. Ebrahimi, J. Faiz. Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 10, pp. 2673–2682, 2010.
9. B. M. Ebrahimi, J. Faiz, M. Javan-Roshtkhari, A. Z. Nejjhad. Static eccentricity fault diagnosis in permanent magnet synchronous motor using time stepping finite element method. *IEEE transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4297–4300, 2008.



*Рогинская Л. Э., Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Меднов А. А.*  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## **РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНО-ДЕВЯТИФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ 18-ПУЛЬСНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

*Аннотация.* В статье произведено исследование работы многопульсного выпрямительного устройства при питании от трехфазно-девятифазного автотрансформаторного преобразователя. Рассмотрена схема и особенности работы преобразователя. Представлены результаты моделирования в программе *Matlab* работы устройства на активно-индуктивную нагрузку. Рассчитаны энергетические показатели качества работы преобразователя и произведено сравнение с известной схемой трехфазно-девятифазного трансформатора с соединением вентильных обмоток в звезду и зигзаги.

*Ключевые слова:* трансформатор, автотрансформатор, выпрямитель, коэффициент гармоник, постоянный ток.

В настоящее время для модернизации источников питания постоянного тока с трехфазными мостовыми выпрямителями широко используются многофазные трансформаторные или автотрансформаторные преобразователи числа фаз, позволяющие значительно улучшить качество работы источников за счет исключения или значительного ослабления величин высших гармоник в кривых выпрямленного напряжения и потребляемого тока питающего трансформатора. Для питания потребителей постоянного тока, требовательных к качеству напряжения и тока источника, например, для мощных систем электроснабжения электроподвижных составов и городского электротранспорта, наряду с известной схемой 12-пульсного выпрямления на базе трансформатора с двумя вентильными обмотками, соединенными в звезду и треугольник, возможно применение трехфазно-девятифазного трансформаторного преобразователя числа фаз (ТПЧФ) с тремя вентильными обмотками, соединенными в звезду и два зигзага (рис. 1, а) [1]. Несмотря на ее преимущества в виде более сглаженного выпрямленного напряжения (без учета фильтров) и формы потребляемого тока ТПЧФ, более близкой к синусоидальной, известен недостаток такого ТПЧФ, заключающийся в несколько более высокой величине его установленной мощности, по сравнению с ТПЧФ для 12-пульсного выпрямителя [2].

Для уменьшения установленной мощности преобразователя для питания 18-пульсного выпрямителя была предложена схема трехфазно-девятифазного автотрансформаторного преобразователя числа фаз (АТПЧФ) (рис. 1, б), которая обеспечивала, как показали проведенные расчеты, уменьшение установленной мощности на 4%, по сравнению со схемой по рис. 1, а [1, 3]. Особенностью данной схемы является наличие катушек с отпайками, электрически связанными с катушками, образующими вторую и третью трехфазные системы, сдвинутые относительно первой трехфазной системы для получения заданной многофазной системы напряжений. Выбор чисел витков катушек вентильных обмоток производится исходя из векторной диаграммы симметричной 9-фазной системы напряжений. В результате сумма магнитодвижущих сил фазы вторичной системы оказывается также ниже, по сравнению с ТПЧФ по рис. 1, а. Как и в случае ТПЧФ, показанный АТПЧФ может быть выполнен с применением одного трехстержневого магнитопровода.

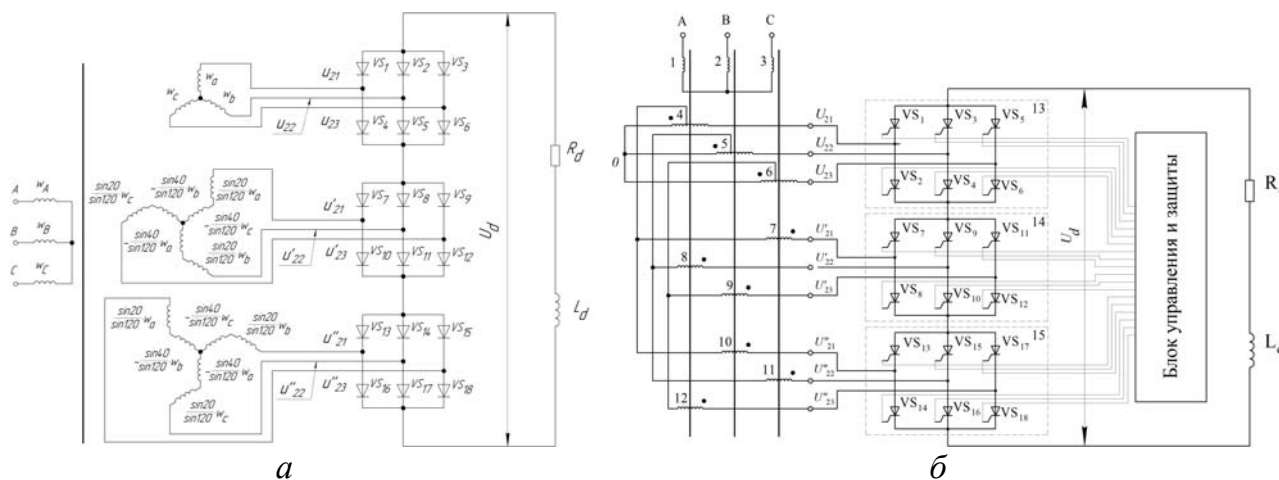


Рис. 1. Схемы преобразователей числа фаз:  
а – ТПЧФ, б – АТПЧФ

Для подтверждения эффективности предложенного решения помимо результатов расчета установленной мощности целесообразно произвести исследование и расчет энергетических показателей работы АТПЧФ. Для этого в программном комплексе *Matlab* (библиотеки *Simulink* и *PowerSystems*) была создана компьютерная модель АТПЧФ при совместной работе с 18-пульсным выпрямителем. Результаты моделирования в виде осциллограмм токов и

напряжений на элементах системы, а также магнитного потока представлены на рис. 2. На рис. 2, а показана осциллограмма выпрямленного напряжения, на рис. 2, б – осциллограмма тока, потребляемого АТПЧФ [4]. На рис. 2, в приведена осциллограмма магнитного потока стержня, на рис. 2, г – осциллограмма намагничивающего тока фазы.

Для оценки качества работы АТПЧФ были произведены расчеты энергетических показателей. Для выпрямленного напряжения по рис. 2, а был определен его гармонический состав и рассчитан общий коэффициент пульсаций, а также коэффициент пульсаций по 18-й гармонике по формулам [5, 6]:

$$k_{\pi} = \frac{U_{m\sim}}{U_d} = \frac{12,5}{1644} = 0,0076; k_{\pi 18} = \frac{U_{m18}}{U_d} = \frac{10,22}{1644} = 0,0062,$$

где  $U_{m\sim}$  – амплитуда пульсаций переменной составляющей напряжения, В;  $U_d$  – среднее значение выпрямленного напряжения, В;  $U_{m18}$  – амплитуда 18-й гармоники в кривой выпрямленного напряжения, В.

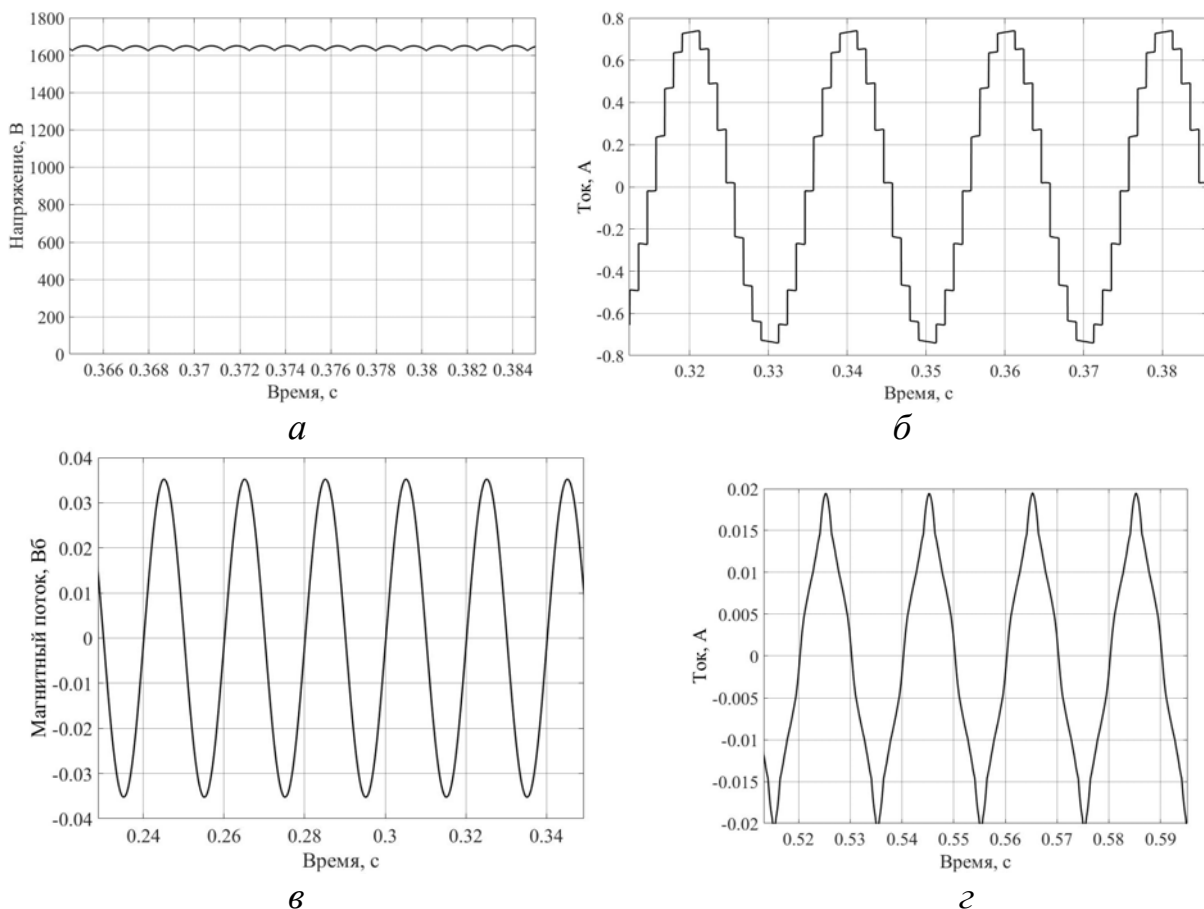


Рис. 2. Осциллограммы: а – выпрямленное напряжение, б – потребляемый ток, в – магнитный поток, д – намагничивающий ток

Коэффициент гармоник кривой потребляемого тока АТПЧФ, показанного на рис. 2, б:

$$k_{rI} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{0,028^2 + 0,028^2 + 0,014^2 + 0,014^2 + 0,007^2 + 0,007^2 + \dots}}{0,5242} = 0,1009,$$

где  $I_n$  – действующие значения высших гармоник потребляемого тока с номерами  $n$ , А;  $I_1$  – действующее значение первой гармоники первичного тока АТПЧФ, А.

Коэффициент искажения потребляемого тока:

$$k_{uI} = \frac{I_1}{I} = \frac{0,5242}{0,527} = 0,995,$$

где  $I$  – действующее значение первичного тока АТПЧФ, А.

Тогда входной коэффициент мощности АТПЧФ [5]:

$$\chi = k_{uI} = 0,995.$$

Таким образом, как видно из представленных расчетов, предложенная схема АТПЧФ обеспечивает энергетические показатели качества работы установки, не уступающие показателям [7] при использовании «базового» трехфазно-девятифазного ТПЧФ с соединением вторичных обмоток по схемам звезды и двух зигзагов. При этом меньшая величина установленной мощности обуславливает рациональность применения таких АТПЧФ для получения высокоэффективных источников питания постоянного тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Фазопреобразующий трансформатор как элемент системы повышения электромагнитной совместимости управляемого полупроводникового преобразователя с сетью и нагрузкой // Практическая силовая электроника. 2016. № 3 (63). С. 28–34.
2. Roginskaya L.E., Gorbunov A.S. Determination of installed power of autotransformer phase number converters to improve electromagnetic compatibility // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 15-18, 2018, Moscow, Russia. 2019. P. 1-6.
3. Пат. 2661890 Российская Федерация, МПК Н 02 М 7/08. Преобразователь переменного напряжения в постоянное (варианты) / Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А.;

- заявитель и патентообладатель Уфа, Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. № 2017114230; заявл. 24.04.2017; опубл. 20.07.2018, Бюл. № 20. 19 с.
4. Roginskaya L.E., Gorbunov A.S. Application of autotransformer converters of the number of phases in DC power supplies with increased energy parameters // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 15-18, 2018, Moscow, Russia. 2019. P. 1-6.
5. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров. 5-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2015. 667 с.
6. Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование выпрямителей. Учебное пособие по курсу «Элементы систем автоматики» (Часть I). СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. 169 с.
7. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Уменьшение влияния на окружающую среду электромагнитных помех, создаваемых управляемыми полупроводниковыми преобразователями, при помощи фазопреобразующих трансформаторов // Экологические системы и приборы. 2017. № 11. С. 50–61.

*Рогинская Л. Э., Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Меднов А. А.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАГНИТОПРОВОДОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ**

*Аннотация:* В статье рассмотрены вопросы конструирования магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов с пространственными магнитными системами – стыковой и навитой. Дано описание конструкции стержней, ярм и способа их соединения для стыковой системы, а также описание конструкции навитой системы со способом прессовки готового магнитопровода с обмотками. Приведены результаты расчетов потерь холостого хода трансформаторов с плоской трехстержневой и пространственной навитой магнитными системами.

*Ключевые слова:* трансформатор, магнитопровод, пространственная магнитная система, стержень магнитопровода, ярмо магнитопровода.

Современные требования к проектированию и изготовлению силовых трансформаторов с максимально возможной эффективностью работы при пониженных электрических и магнитных потерях и оптимальной стоимости обуславливают задачу выбора качественных активных материалов и рациональных конструкций элементов трансформаторов.

Одним из способов уменьшения магнитных потерь в трехфазных трансформаторах является применение пространственной магнитной системы вместо широко применяемых плоских трехстержневых систем. Кроме того, плоская трехстержневая магнитная система, как известно, является несимметричной, что обуславливает неравенство намагничивающих токов фаз.

В трехфазных трансформаторах известны пространственные стыковые (рис. 1, а) и навитые (рис. 1, б) магнитные системы [1].

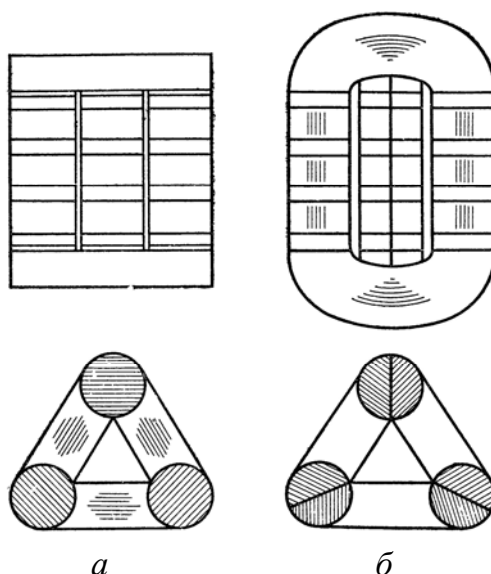
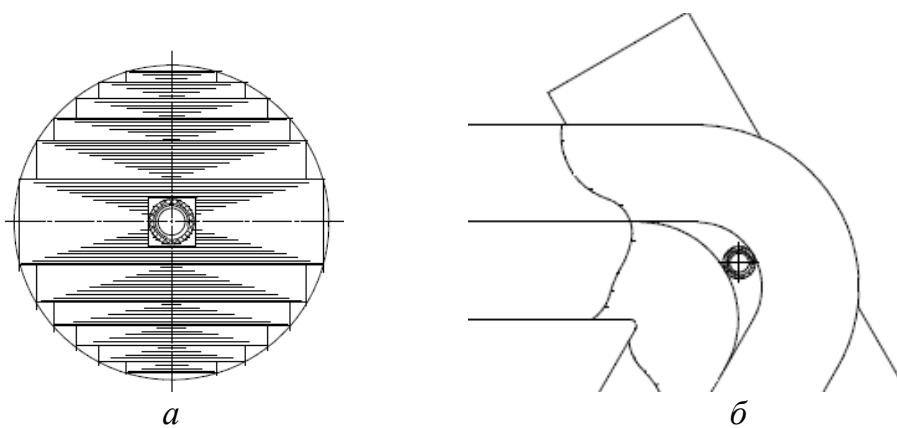


Рис. 1. Пространственные магнитные системы:  
*а – стыковая, б – навитая*

Пространственная стыковая магнитная система состоит из стержней, набираемых из листов рулонной холоднокатаной электротехнической стали с объединением листов в пакеты, аналогично стержням плоской трехстержневой магнитной системы (рис. 2, а). Ярма магнитопровода навиваются из ленточной электротехнической стали. Пакеты стержня имеют одинаковые размеры по высоте для того, чтобы их впоследствии соединить встык с верхним и нижним ярмами посредством специальных прокладок и магнитного клея. Стяжка верхнего и нижнего ярм со стержнями производится при помощи сквозных шпилек, проходящих в специальных квадратных отверстиях в стержнях и между кольцевыми пакетами ярма (рис. 2, б).

Пространственная навитая магнитная система получается путем соединения трех навитых колец, получаемых из ленты переменной ширины (рис. 1, б) [2]. После сборки колец друг с другом они стягиваются при помощи бандажей из стеклоленты (рис. 3, а). При этом каждое кольцо может быть также получено путем набора отдельных пакетов из ленты различной ширины, как показано на рис. 3, б [3].

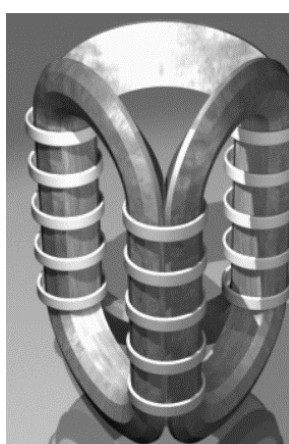


*a*

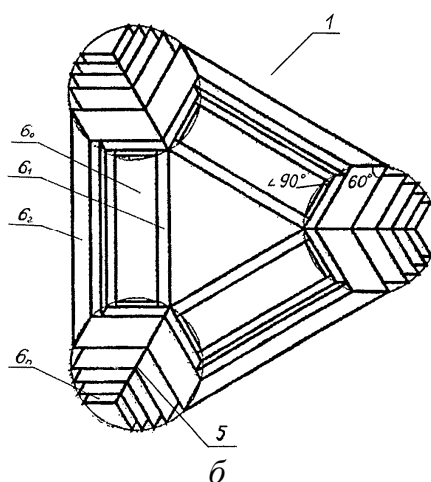
*б*

*Рис. 2. Соединение стержня и ярма:*

*a – стержень с центральным отверстием; б – пакеты ярма с зазором для шпильки*



*a*



*б*

*Рис. 3. Пространственная навитая магнитная система:*

*a – внешний вид со стяжными бандажми, б – набор колец из пакетов*

Внешний вид собранного трансформатора с пространственной навитой магнитной системой приведен на рис. 4 [4]. Как видно, после намоток обмоток 5 на собранный магнитопровод 3 из трех колец, конструкция стягивается при помощи верхних 2 и нижних 6 балок и шпилек 1. При этом к нижним балкам крепятся опоры.

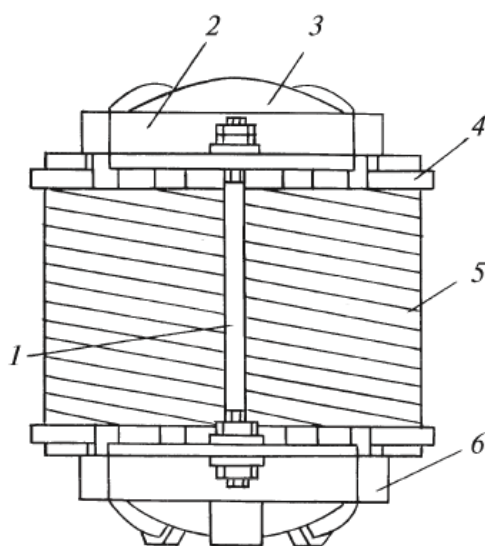


Рис. 4. Трансформатор с пространственной навитой магнитной системой

Как показали проведенные авторами расчеты, применение пространственной стыковой магнитной системы позволит снизить величину магнитных потерь на 10% по сравнению с плоской трехстержневой магнитной системой (рис. 5) [5]. Для пространственной навитой магнитной системы такое снижение магнитных потерь составило 6%. Однако преимущество навитой системы в виде значительного снижения тока холостого хода обуславливает целесообразность использования такой системы для получения трансформаторов с пониженными значениями магнитных потерь и тока холостого хода в дополнение к применению современных марок электротехнических сталей с минимальными удельными магнитными потерями. Это позволяет получать на практике энергоэффективные силовые трансформаторы с пониженными потерями и повышенным КПД.

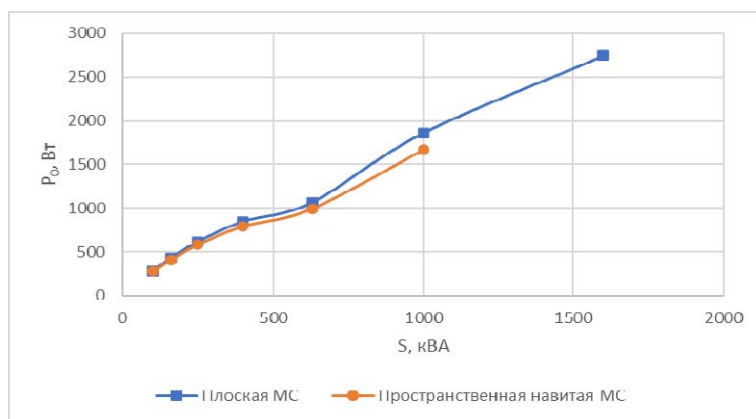


Рис. 5. Результаты расчета магнитных потерь трансформаторов



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для студентов электротехнических и электромеханических специальностей вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.
2. Насыпаная Е.П. Моделирование и проектный синтез энергоэффективных трансформаторов с цилиндрическими слоевыми обмотками : дисс. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Насыпаная Елена Петровна. – Одесса, 2015. – 227 с.
3. Пат. 115557 Российская Федерация, МПК Н 01 F 27/25. Пространственный магнитопровод для трехфазного трансформатора / Заявитель и патентообладатель Чебоксары, ОАО "ВНИИР". № 2011143270/07; заявл. 26.10.2011; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
4. Шонин Ю.П., Путилов В.Я. Монтаж, техническое обслуживание и ремонт силовых масляных трансформаторов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 760 с.
5. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. К вопросу влияния типа магнитной системы на параметры холостого хода силовых трансформаторов мощностью 100-1600 кВА, класса напряжения 10 кВ // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. – Уфа, 2021. – С. 103–109.

*Охотникова Т. С., Исмагилов Ф. Р., Охотников М. В., Нусенкис А. А.*

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
ООО «Курс»

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

*Аннотация:* В данной работе рассматриваются экономические и технические факторы возникающие при потерях электроэнергии на линиях электропередачи. Экономические факторы выражены в размере финансовых убытков от величины потерь электроэнергии, технические же представляют собой конструктивные предложения по снижению объемов потерь электроэнергии, результатом которых является все те же экономические показатели снижения финансовых убытков. Определены процентные объемы возникающих потерь в целом во всей сети на территории России, проанализированы тенденции их поведения за последние десять лет, выделен размер потерь проявляющийся на всем протяжении линии и выражающийся в возникновении эффекта коронирования. Анализируется влияние эффекта коронирования на линиях электропередач, проведено компьютерное моделирование показывающее изменение картины поля, зависящее от величины напряженности и геометрических особенностей токопроводящей жилы. Рассматривается возможность снижения потерь за счет применения изоляционного покрытия проводов на линии электропередач. Рассмотрены технические параметры предлагаемых материалов из которых наиболее важной является величина пробивного напряжения. Приведены результаты компьютерного моделирования изменения величины напряженности электрического поля при удалении от провода в нескольких вариантах, без изоляции на проводе, с использованием изоляционного слоя и при наличии, и отсутствии дефекта провода. Итоговым результатом является показатель характеризующий важность применения изоляционного покрытия выраженный в снижении объема потерь электроэнергии и величине финансовых средств не потерянных в результате сокращения объема потерь электроэнергии. Представлено решение компании ПАО «Россети» подтверждающее необходимость проведения подобных исследований в энергетической отрасли.

*Ключевые слова:* электрические потери, коронирование, гололед, покрытие провода

Согласно публичным данным предоставляемыми в отчетах Федеральной службы Государственной статистики (Росстата), ПАО «Россети», а так же исходя из других источников, потери электроэнергии на линиях электропередач (ЛЭП) Российской Федерации (РФ) зависят от различных факторов определяющих в целом работу ЛЭП [1, 2, 3]. Отслеживая динамику колебания потерь, можно заметить, что из года в год процент суммарных потерь в целом по России, от общего объема передаваемой энергии колеблется в диапазоне от 7,3 до 13% (рис. 1). Уровень потерь электрической энергии, по итогам 2019 года составил 7,34 %, тем самым показывая стабильное снижение, в сравнении с уровнем в 8,95 % потерь за предыдущий год и 9,22% в 2017 году [1]. Доля потерь при коронировании в этом случае составляет порядка 35% от всех потерь, но он может изменяться в течении года, под влиянием погодных факторов [2]. Потери по данным публичных отчетов (по данным Системного оператора Единой энергетической системы), в 2019 году составили 71 242,2 млн. кВт·час, что показало снижение на 3 300 млн. кВт·час по сравнению с предыдущим годом (без учета технологически изолированной энергосистемы). В денежном эквиваленте суммарные потери тем не менее составляют значительную сумму и превышают 200 млрд. руб., из которых практически треть составляют потери из-за короны на ЛЭП [1, 4]. Оставшийся объем потерь составляют потери в оборудовании участвующем при генерации и передаче электроэнергии, утечки электроэнергии возникающие в результате аварий, а так же хищение электроэнергии из сети. В декабре 2019 г. Совет директоров ПАО «Россети» утвердил новую Стратегию ПАО «Россети» на период до 2030 г., определяющую цели развития группы компаний «Россети» и направленную на дальнейшее снижение потерь электроэнергии.

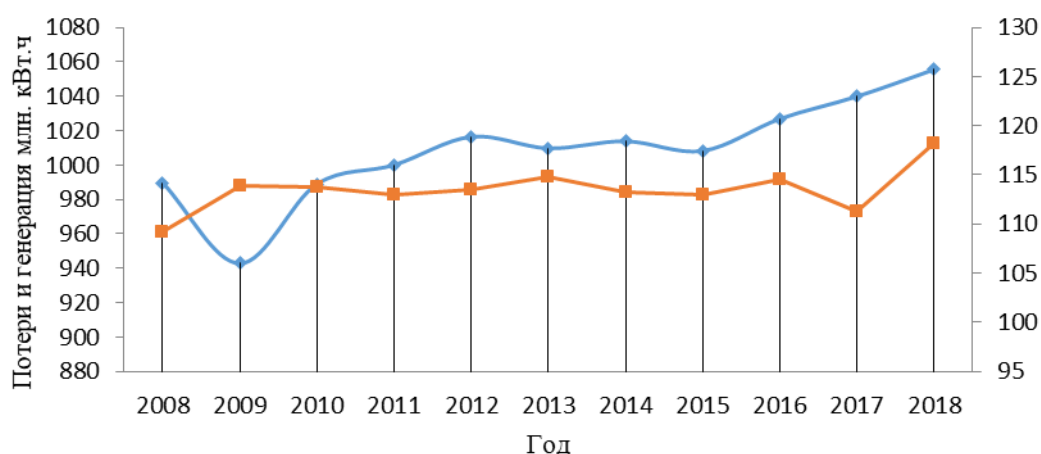


Рис. 1. Объемы потерь и передаваемой электроэнергии

Если потери возникающие в оборудовании, а так же при хищении электроэнергии возможно снизить путем модернизации точек подключения

потребителя либо проведя установку энерго-эффективного оборудования, то потери возникающие на ЛЭП при коронировании возможно устранить лишь проведя оценку и исследование целого ряда факторов влияющих на возникновение данного эффекта на определенном участке сети.

Сам эффект коронирования возникающий вокруг токоведущего элемента ЛЭП, появляется в следствии ионизации токопроводящих частиц в образующемся электрическом поле высокой напряженности, что приводит к утечке тока в атмосферу [5]. Потери при этом определяются затратами энергии на перемещение ионов, составляющих объемный заряд, по направлению от провода. Превышение допустимых значений напряженности поля  $E_0$ , к примеру, из-за повышения напряжения на линии, либо увеличение влажности приводит к значительному снижению диэлектрической проницаемости окружающего линию воздуха, что в свою очередь приведет к возникновению электрического разряда и как факту увеличению потерь.

Процесс выявления и регистрации участков потерь электроэнергии составляет многоступенчатую структуру (рис. 2)

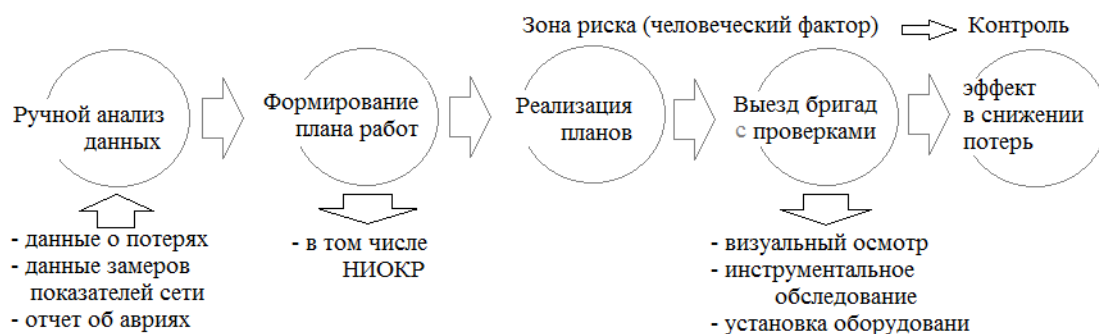


Рис. 2. Процесс выявления участков потерь

Устранить либо снизить эффект коронирования, на существующих ЛЭП, без применения капитальных затрат и внесения существенных изменений в конструкцию линии, возможно внесением диэлектрического слоя из полимерных материалов (табл. 1) на выявленном участке. Линии с проводниками, покрытыми изоляцией, уже достаточно известны и используются в основном на напряжении 0,4 кВ, в основном для подключения потребителей. Изоляция на такие провода наноситься на предприятии-изготовителе при их производстве с помощью экструдеров [6]. Однако, произвести замену используемых на ЛЭП неизолированных проводов учитывая протяженность линий в РФ, которая составляет более 2,34 млн. км, из которых 447 тыс. км. – с напряжением выше 110 кВ [7], на изолированные весьма затратное дело и потребует значительного времени.

## Полимерные материалы

	Пробивное напряжение кВ/мм	Адгезионная прочность Н/10мм	Относит. диэлектрическая проницаемость	Температура эксплуатации	Удельное сопротивление, Ом/м	Изгиб
ПВХ (лента)	Рис. 5	3	3	-45 +80	$10^{12}$	0.1
Резина (жидкая)	Рис. 5		4	-45 +65		0.1
Резина (2х компонент-й силикон, аэрозоль)	Рис. 5		2,6-3,5	-45 +75		0.1
Силикон	Рис. 5		2.8-3,8	-45 +85	1015	0.1
Полиэтилен	40		2,3-2,4		1016	0.1
Плексиглас	18		3,5	-40 +80	$10^{13}$	
Полистирол	30		2,4-2,6		$10^{17}-10^{19}$	
Полихлорвинил			3	-60 +70	$10^{16}$	
Резина (лента)	20					0.1-5
Полиимид (лента)	7	150	3-3,5	-100 + 200	$10^{14}-10^{15}$	(60-90 мкм)
Слюда	100		5,7-7		$10^{16}$	0.1-5
Фторопласт-4	25		1,74	-260 +127	$10^{17}-10^{18}$	14-18
Лакоткань тип 111	5,5	0.15	3,5-3,6	-50 +180	$10^{11}-10^7$	0.5-10

Обладающие различной диэлектрической проницаемостью полимеры (табл. 1), при наступлении электрического пробоя будут снижать значение критической напряженности поля [8]

$$E_d = \frac{q_{0n}}{2\pi\epsilon_0 r_n}; \quad (1)$$

где  $r_n$  – расстояние от провода до точки наблюдения;  $q_{0n}$  – заряд на поверхности провода.

Критическое напряжение коронного разряда в данном случае будет определяться по формуле

$$U_k = 21,28 \ln \frac{S}{r_0} m_1 m_2; \quad (2)$$

где  $m_1$  – коэффициент гладкости провода (для идеально гладкого провода  $m_1 = 1$ , для реального витого провода  $m_1 = 0.85 - 0.92$ , согласно эмпирическим данным, приведенным в [9],  $m_2$  — коэффициент погоды,  $\delta$  – относительная плотность воздуха.

При нанесении полимерного покрытия на провод напряженность поля на поверхности провода  $E_d$  будет как

$$E_d = \frac{U}{2\pi\epsilon_0 r_0} \cdot \frac{C_d C_b}{C_d + C_b}; \quad (3)$$

где  $C_b$  – емкость воздушного промежутка;  $C_d$  – емкость слоя диэлектрика,  $r_0$  – радиус провода с изоляцией,  $U$  – напряжение на проводе.

С целью подтверждения аналитических выражений в программном комплексе *Ansys Maxwell* проведено моделирование равномерного распределения напряженности поля вокруг провода (АС-50/8) (рис. 3а) и при

наличии дефекта (рис. 3б), с нанесением экспоненциальных зон одинаковой напряженности.

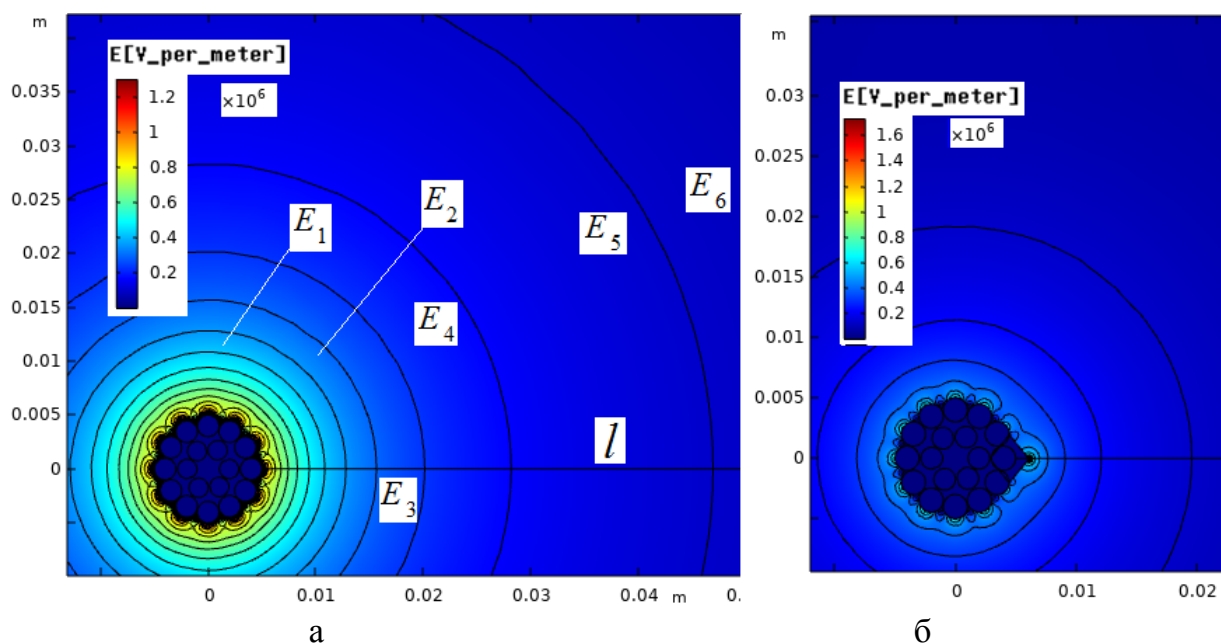


Рис. 3. Картина поля

Расчет потерь на корону одиночного провода с переменным напряжением проводится по формуле Пика [13]:

$$P = \frac{24.1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_\Phi - U_k)^2 \cdot 10^{-5}; \quad (4)$$

где  $\delta$  — относительная плотность воздуха,  $f$  — частота, Гц,  $r_0$  — радиус одиночного провода, см,  $S$  — расстояние между проводами, см,  $U_\Phi$  — действующее значение фазного напряжения, кВ,  $U_k$  — напряжение возникновения короны, кВ.

Согласно рис. 3, при отсутствии дефектов наблюдается равномерное распределение напряженности, в свою очередь наличие дефекта приводит к возникновению скачка напряженности.

Согласно результатам моделирования рис. 3 представлены характеристики влияния полимерного покрытия (рис. 4) на величину напряженности поля по направляющей  $l$ .

Как можно видеть, наличие полимерного покрытия на проводе, приводит к снижению уровня напряженности на итоговой поверхности диэлектрика. К примеру, слой силиконового покрытия толщиной 0,5 мм позволяет снизить напряженность на 31% при напряжении 35 кВ. Участок  $b$  при этом характеризуется падением напряженности в диэлектрике. Наличие дефекта на проводе, являющегося острой кромкой, не выходящей за основной диаметр провода, приводит к скачку напряженности в данном месте на 35%.

Выступающий же дефект всего на 2 мм приводит к скачку напряженности поля уже на 16% до  $2.2 \times 10^6$  В/м. В свою очередь покрытие данного участка диэлектриком слоем в 0,5 мм позволяет устранить прямой контакт с точкой коронирования и снизить напряженность поля до  $1.1 \times 10^6$  В/м.

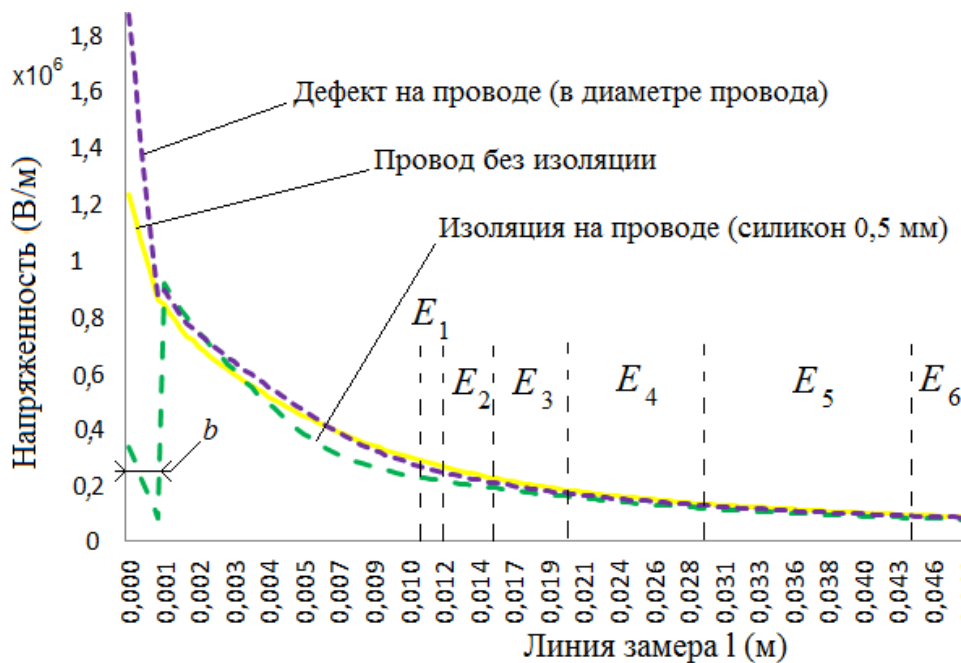


Рис. 4. Характеристики распределения напряженности поля

В табл. 2 приведены максимальные уровни напряженности на поверхности провода при наличии слоя диэлектрика в  $b = 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5$  мм., в то же время распределение напряженности поля вокруг провода без изоляции показали максимальное значение напряженности поля в  $9.25 \times 10^5$  В/м.

Таблица 2

Напряженность поля на изоляции вокруг провода, В/м

толщ. слоя материал	$b=0.5$ мм	$b=1$ мм	$b=1,5$ мм	$b=2$ мм	$b=2,5$ мм
Без изоляции	$9.25 \times 10^5$				
Резина	$9.25 \times 10^5$	$7.8 \times 10^5$	$7.2 \times 10^5$	$6.7 \times 10^5$	$6.26 \times 10^5$
Полиэтилен	$9,27 \times 10^5$	$7,99 \times 10^5$	$7,26 \times 10^5$	$6,7 \times 10^5$	$6,27 \times 10^5$
ПВХ 0,15 мм			$7.23 \times 10^5$	$6.72 \times 10^5$	$6.25 \times 10^5$
Силикон	$9,15 \times 10^5$	$8 \times 10^5$	$7,34 \times 10^5$	$6,83 \times 10^5$	$6,41 \times 10^5$

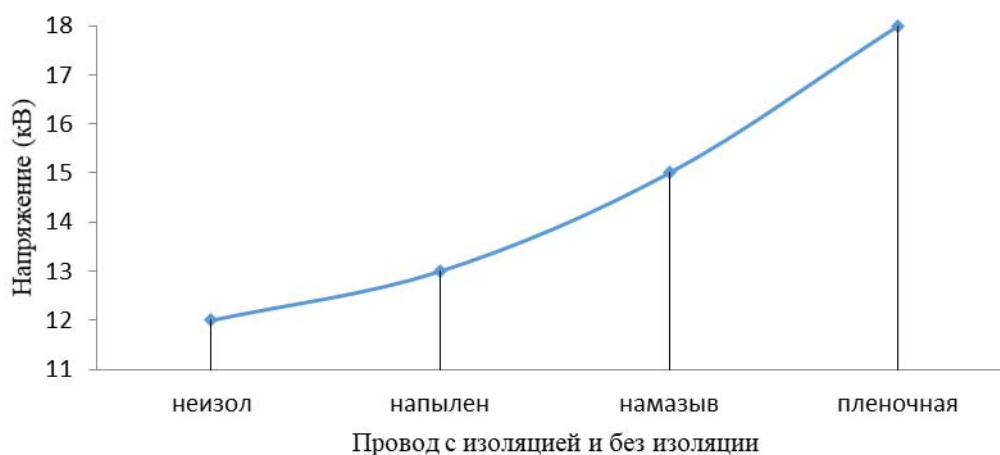


Рис. 5. Характеристика пробивного напряжения на проводе

Учитывая полученные при моделировании данные распределения напряженности поля вокруг провода с учетом полимерного покрытия толщиной 0,2 – 0,5 мм на основании уравнения (5) можно говорить о снижении потерь на корону до 10 %, что в рамках общей сети позволит сэкономить порядка 7 млрд. кВт·час, что составляет около 22 млрд руб.

Перспективность и необходимость в проведении исследований в области электроэнергетики определяется тенденциями развития промышленного сектора экономики России, развитием возобновляемых источников энергии и т.д., что и демонстрирует компания ПАО «Россети» выделяя 0,25 % от собственной выручки на проведение НИОКР в данной области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годовые отчёты ОАО «Россети» и ПАО «Россети» 2010-2019 г.г, [rosseti.ru](http://rosseti.ru).
2. А.А. Геркусов, В.М. Макаров Техничко-экономическое нормирование потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кв и выше. «Вестник ИГЭУ» Вып. 4 2016 г. С. 49 - 56.
3. Геркусов А.А. Оптимизация потерь электроэнергии, передаваемой по воздушным линиям 110 кВ и выше // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – № 1(214). – С. 89–96.
4. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2018 году. АО «СО ЕЭС» [www.so-eps.ru](http://www.so-eps.ru).
5. Довбыш В.Н., Сподобаев Ю.М. Оценка радиочастотных помех, создаваемых короной высоковольтной линии электропередач. Спецвыпуск Т Comm, август. 2009. С. 77 – 79.
6. ГОСТ 6323-79 Провода с поливинилхлоридной изоляцией для электрических установок. Технические условия.
7. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с. : ил.
8. Б.К. Сивяков, А.А. Скрипкин, Д.Б. Сивяков, А.В. Цыганков Электрическое и магнитное поля высоковольтной воздушной линии на удалении от нее. Вестник СГТУ. 2015. № 3 (80) С. 200-206.
9. Капцов Н.А. Коронный разряд. — М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1947. — 256 с.

*Холошина Д. В., Охотников М. В.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Аннотация:* В статье анализируются перспективы применения нейронных сетей в электроэнергетических системах. Рассматриваются понятие, специфика функционирования и преимущества нейронных сетей, приводятся основные виды искусственных нейронных сетей. Выявляются особенности использования нейронных сетей в электроэнергетических системах и наиболее перспективные для применения искусственных нейронных сетей области электроэнергетики, связанные с прогнозированием, диагностикой и управлением электроэнергетическими системами.

*Ключевые слова:* нейронные сети, электроэнергетика, электроэнергетические системы, прогнозирование, модели ИНС.

### **Введение**

Электроэнергетика является крайне важной составляющей экономики государства, в значительной степени влияющей на результативность деятельности предприятий, которая зависит от уровня потребления электроэнергии, безотказности работы оборудования, потерь при передаче энергии и иных сопряжённых издержек [1]. Эффективность функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) во многом зависит от инфраструктурного и технического оснащения и требует широкого внедрения интеллектуальных систем, обеспечивающих необходимую для дальнейшего технологического развития структуру. Одним из наиболее перспективных методов интеллектуализации электроэнергетики в части прогнозирования, управления, оптимизации и прочего является применение искусственных нейронных сетей (ИНС) [2]. Увеличение доступных вычислительных возможностей и цифровая трансформация общества обуславливают возрастающую популярность использования ИНС, что делает актуальным рассмотрение возможностей применения этой технологии в электроэнергетике.

Целью работы является изучение перспектив применения нейронных сетей в электроэнергетических системах. Для её достижения были использованы методы анализа и синтеза научных публикаций и литературных источников по рассматриваемой теме.

### **Специфика функционирования нейронных сетей**

ИНС представляют собой вычислительные модели, функционирующие аналогично работе нервной системы человека [3]. Можно выделить несколько видов ИНС, реализующихся на основе набора параметров и математических операций, требуемых для определения выходных данных:

1. ИНС прямого распространения. Применяется при распознавании речи и компьютерном зрении в случаях сложности классификации целевых классов.



2. ИНС радиально-базисных функций. Используется в системах восстановления энергии, обеспечивая высокую скорость и надёжность восстановления сложных силовых систем.

3. Самоорганизующаяся ИНС Кохонена. Применяется для распознавания закономерностей в данных.

4. Рекуррентная ИНС. Широко используется в моделях обработки видео и преобразования текста в речь.

5. Свёрточная ИНС. Применяется для распознавания и классификации различных объектов и распознавания речи.

6. Модульная ИНС. Используется в сложных вычислительных процессах, которые в ходе обработки разбиваются на более мелкие компоненты с целью уменьшения сложности и увеличения скорости вычислений.

Одной из ключевых особенностей ИНС является их обучаемость, основанная на изучении подобранных примеров из загруженной базы данных [4]. Обучение может осуществляться с учителем, без наставника либо в смешанном варианте.

Другая особенность ИНС заключается в возможности работы с различными источниками данных. ИНС способны анализировать информацию разного происхождения при решении одной задачи, делая на её основании соответствующие выводы и выдавая ответы. При грамотном обучении ИНС при работе с большими объёмами различных данных способны параллельно решать несколько разнотипных задач.

Преимуществами ИНС являются быстрые алгоритмы обучения и возможность работы в условиях наличия шумов во входных сигналах [5]. При соблюдении требований построения структуры сети с учётом избыточности нейронов, которые зависят от числа и выборки информативных сформированных для обучения признаков, надёжность ИНС может быть очень высока. Также ИНС присущи такие достоинства, как адаптивность, масштабируемость, позволяющая увеличивать скорость вычислительных процессов, нелинейная зависимость прогнозируемых значений от фактических значений временного ряда и значений величин внешних факторов, то есть способность формирования нелинейных зависимостей между прогнозируемыми и фактическими значениями процессов, и единообразие анализа и проектирования [6].

### **Особенности использования нейронных сетей в электроэнергетических системах**

ИНС имеют длительную историю применения в ЭЭС, что обусловлено достаточно высокой точностью даваемых ИНС предсказаний [7]. Правильный прогноз имеет большую роль в системах электроэнергетики, поскольку позволяет повысить энергоэффективность электрических сетей, снижая расход энергоносителей.

Наиболее перспективными для применения ИНС областями электроэнергетики являются:

1. Прогнозирование нагрузки ЭЭС. Представляет большой интерес с точки зрения планирования и развития ЭЭС, поскольку позволяет сформировать диспетчерский график электрической нагрузки, используемый для регулирования технологического режима системы [8]. Прогнозирование электроэнергетических режимов осуществляется для различных временных периодов, однако наиболее актуальным для обеспечения устойчивой работы ЭЭС является краткосрочное прогнозирование электропотребления с дискретностью 1 час. При краткосрочном прогнозировании чаще всего применяются обобщённо-регрессионные ИНС, многослойный персептрон, сети на радиальных базисных функциях и линейные ИНС. Конфигурация ИНС определяется графиком электропотребления, зависящим от объекта прогнозирования. Выбор модели ИНС зависит от её размерности: в случае недостаточного размера сети расчёты будут иметь низкую точность, а при чрезмерно большой размерности повышается длительность обучения и увеличивается сложность решаемой задачи [9].

2. Прогнозирование цен на электроэнергию. Специфические характеристики электроэнергии определяют уникальную для этого продукта динамику цен, не свойственную ни одному другому рынку [10]. Прогнозирование динамики цен на рынке электроэнергии может быть кратко-, средне- и долгосрочным и осуществляется с использованием ИНС прямой связи, включающих сеть радиальных базисных функций, однослойные и многослойные персептроны, и рекуррентных ИНС, представленных простыми рекуррентными сетями и самоорганизующимися картами Кохонена. Перспективными направлениями применения ИНС при прогнозировании цен на электроэнергию являются разработка объективного метода для выбора минимального набора эффективных входных переменных, использование плотностей и интервалов прогнозирования или вероятностного прогнозирования, а также создание гибридных систем прогноза.

3. Диагностика и локализация неисправностей. Основным преимуществом ИНС при диагностике аварийных ситуаций выступает их гибкость при значительном потоке данных и информационном шуме [11]. В то же время существенным недостатком ИНС является длительный период обучения, для сокращения которого до приемлемых результатов могут применяться обобщённо-регрессионные ИНС с топологией прямой передачи сигнала, вероятностные ИНС и адаптивные нечёткие ИНС. Также крайне перспективным представляет применение ИНС для прогнозирования структурных катастроф, основной ущерб от которых вызывается каскадным разрушением связей между элементами.

4. Оптимизация распределения нагрузки. Основной целью оптимизации распределения нагрузки является минимизация эксплуатационных расходов с учётом спроса [12]. Сложность этого процесса заключается в физических ограничениях доступности всего рабочего диапазона генерирующих источников. Перспективными для решения комбинационных задач оптимизации являются ИНС Хопфилда, ИНС типа LVQ и многослойный персептрон.

5. Ситуационное управление ЭЭС. Синтез ИНС и генетических алгоритмов позволяет создать эффективную модель интеллектуальной поддержки принятия стратегических решений по развитию ЭЭС [13]. Качественное прогнозирование и своевременные рекомендации по выбору управляющих воздействий способны предотвратить развитие критических ситуаций до чрезвычайных и позволяют вернуться к нормальному состоянию ЭЭС.

6. Оценка надёжности. Использование ИНС при оценке надёжности и безопасности ЭЭС позволяет решить проблему экспоненциального роста данных и реализовать эффективную схему ремонта ЭЭС по состоянию [14]. Наиболее оптимальной моделью ИНС для решения данной задачи является многослойный персептрон в сочетании с ИНС Хопфилда, ускоряющей работу системы.

### **Заключение**

Структурно-технологический кризис, в котором находится современная электроэнергетика, требует качественно новых подходов и инфраструктуры, базирующихся на сетевой архитектуре, мультиагентном управлении, самоорганизации, интеллектуальности, масштабируемости, отраслевой интеграции, удобстве и связанности с глобальным информационным пространством. Использование систем интеллектуального управления на основе нейронных сетей даёт возможность комплексно решать актуальные задачи электроэнергетики в части прогнозирования, диагностики и управления компонентами электроэнергетическими системами. В перспективе нейросетевые средства могут занять ведущее положение среди компонентов математического обеспечения электроэнергетических систем, что открывает широкие возможности для исследований.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Коновалов Ю.В., Вайгачёв А.Е. Искусственный интеллект в электроэнергетике // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2021. – № 8. – С. 225-226.
2. Бойсунов Б.П., Ташматова Ш.С. Особенности и тенденции развития нейронных сетей // Мировая наука. – 2021. – № 4 (49). – С. 292-296.
3. Львов Ф.А. Типы и применение нейронных сетей // Кронос: естественные и технические науки. – 2019. – № 2 (24). – С. 25-31.
4. Малыгина Ю.П. Нейронные сети: особенности, тенденции, перспективы развития // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 5 (14). – С. 79-82.
5. Грицай А.С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для энергосбытового предприятия с учётом метеофакторов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Александр Сергеевич Грицай; Омск. гос. техн. ун-т. – Омск, 2017. – 153 с.
6. Урумбаева О.Б., Шалаев Т.А., Шиккульская О.М. Концепция интеллектуального управления энергосетью // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 3 (33). – С. 69-74.
7. Калинин В.Ф. Анализ методов представления данных искусственной нейронной сети для управления электроэнергетическими системами / В.Ф. Калинин, Н.М. Зяблов, С.В. Кочергин,

- А.В. Кобелев, Д.А. Джапарова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 609-616.
8. Торопов А.С., Туликов А.Н. Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 143-151.
9. Чернышова Т.И. Прогнозирование бытовой электрической нагрузки с применением нейронных сетей / Т.И. Чернышова, А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Н.М. Зяблов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 181-190.
10. Васильев В.А., Григорьева А.А. Обзор подходов по прогнозированию цен на электроэнергию с использованием технологий вычислительного интеллекта // Теоретическая экономика. – 2020. – № 5 (65). – С. 87-94.
11. Ковалёв С.П. Применение нейронных сетей глубокого обучения в математическом обеспечении цифровых двойников электроэнергетических систем // Системы и средства информатики. – 2021. – Т 31, № 1. – С. 133-144.
14. Каменев А.С., Королев С.Ю., Сокотущенко В.Н. Нейромоделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных сетей / под ред. В.В. Бушуева – М.: ИЦ «Энергия», 2012. – 124 с.
15. Массель Л.В. Использование машинного обучения в ситуационном управлении применительно к задачам электроэнергетики / Л.В. Массель, О.М. Гергет, А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 3 (15). – С. 5-17.
16. Проталинский О.М. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики / О.М. Проталинский, И.А. Щербатов, А.А. Ханова, И.О. Проталинский // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1 (59). – С. 93-105.

*Калимуллин С. Р., Охотников М. В.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ**

*Аннотация.* В работе рассматривается возможность применения вертикального электростатического фильтра в малых котельных. Рассмотрены преимущества и недостатки. Использование электростатических фильтров позволяет значительно улучшить санитарные нормы по выбросу отходов в атмосферу, но существенные габариты очистных фильтров препятствует их популяции на котельных меньшей мощности. Для уменьшения габаритов очистных устройств необходимо проектирование новых систем, которые работают по принципу электростатического фильтра, но еще и исключая недостатки и с этими же преимуществами. Данная система должна иметь минимальные затраты на монтаж и установку, обладать высокой эффективностью очистки, а также обеспечивать автоматическую очистку дымовых газов.

*Ключевые слова:* электрофильтр, осаждение частиц, напряженность электрического поля, электростатический фильтр.

Из-за холодного климата, преобладающего в России, на территории нашей страны используется большое количество теплоснабжающих объектов. На данный момент в России насчитывается около 485 теплоэлектростанций (ТЭЦ), 6,5 тысяч котельных, около 600 тысяч автономных теплогенераторов и

более 100 тысяч мелких котельных, обеспечивающие обогрев промышленных зданий, частных домов, муниципальных организаций по всей территории нашей страны. Именно поэтому проблема очистки дымовых газов стоит на лидирующем месте [1].

На данный момент очистка осуществляется разными способами, один из которых является использование электростатических фильтров, в основе принципа которого лежит осаждение частиц сажи на осадительных электродах под действием напряженности электростатического поля. Однако на котельных с мощностью менее 20 Гкал/ч очистка не реализована должным образом. Если же рассмотреть количество выбросов данных котельных по всей стране за целый год, то числа колоссальны.

Проанализировав причины отсутствия данных очистных систем, можно выявить ряд недостатков, препятствующих использованию электростатических фильтров в котельных малой и средней мощности:

- большие габариты (из-за большого объема газов и принципа работа осаждения частиц сажи);
- значительная стоимость организации очистки газов с использованием электростатических фильтров.

Электрофильтр для котельных малой и средней мощности должна удовлетворять следующим требованиям:

- компактность;
- эффективность очистки;
- температура очищаемого потока должна составлять 200–300°C;
- легкость обслуживания;
- возможность выдержать разные плотности частиц в дымовом потоке;
- низкая стоимость.

Вышеизложенным требованиям удовлетворяет вертикальный трубчатый электрофильтр [2]. От имеющегося фильтра отличает наличие вращающихся цилиндрических осадительных электродов (ЦОЭ). Принцип работы тот же самый, но очистка сажи производится в отводящих рукавах, отделенных от зоны очистки дыма и осаждения частиц, далее частицы сажи, снятые с ЦОЭ, опускаются напрямую в бункер, предназначенный для их сбора. Использование вращающихся цилиндрических осадительных электродов позволяет сэкономить на напряжении, которое подавалось для встряхивания осадительных электродов. Иглы коронирующего электрода перекрывают просвет между иглами предшествующего электрода для выравнивания области действия напряженности электрического поля и повышения качества очистки дымового потока. Монтаж данной конструкции возможен на трубу дымохода, это

позволяет существенно уменьшить, как финансовые затраты, так и количество работ, связанных с установкой конструкции.

Процесс удаления частиц сажи происходит следующим способом: дымовой поток попадает в область действия электростатического поля высокой напряженности, создаваемого осадительными и коронирующими электродами. Частицы сажи оседают на поверхности ЦОЭ, далее переносятся в отводящие рукава. Скребки переносят сажу в накопительный бункер. Очищенная поверхность повторяет цикл и снова переходит в область осаждения частиц сажи. Для четкого представления работы конструкции, проведено моделирование процесса осаждения частиц и трассировки в программе Ansys.

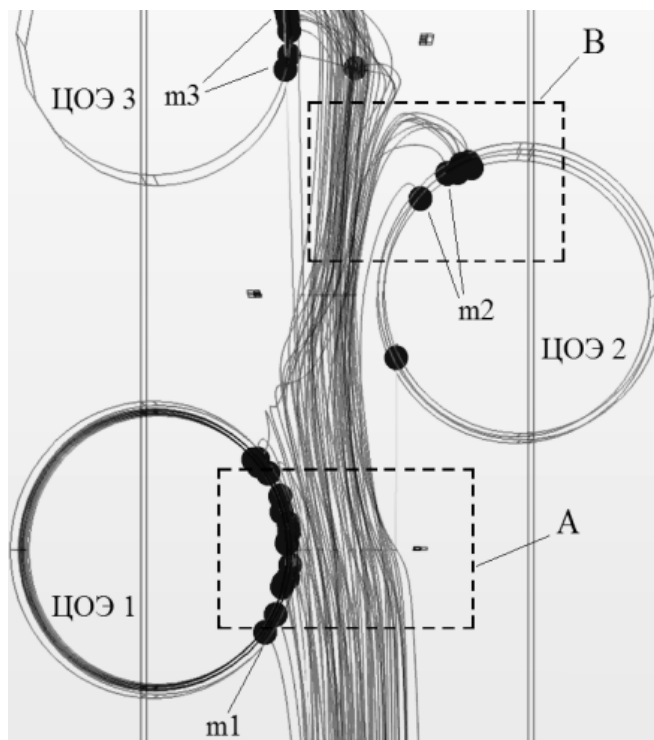


Рис.1. Трассировка частиц сажи

Количество частиц осаждения на представленном выше участке зависит от массы частиц  $m$ , скорости дымового потока  $v$ , величины прикладываемого к электродам напряжения  $U$ , конфигурации поверхности осадительного электрода, количества коронирующих электродов, а также концентрация частиц в потоке.

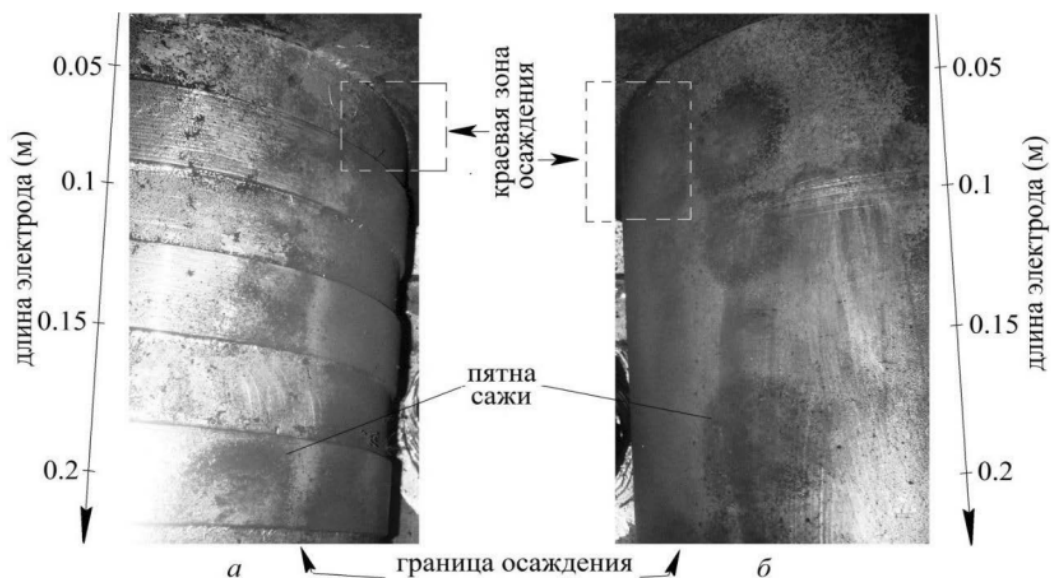


Рис.02. Картина осевших частиц сажи на ЦОЭ

При прохождении через электрофильтр дымового потока часть частиц оседает, просто сталкиваясь с поверхностью электрода, оставшиеся частицы, огибая ЦОЭ, попадают в область действия электростатического поля высокой напряженности, где на частицы помимо основных сил действующих в электрофильтре [3], таких как сила тяги  $F_m$ , индукционные силы, сила кулона  $F_k$ , начинают действовать центробежные силы  $F_u$ , усиливаемые при этом электрическим полем. Их возникновение охарактеризовано конструкцией электрофильтра (рис. 3).

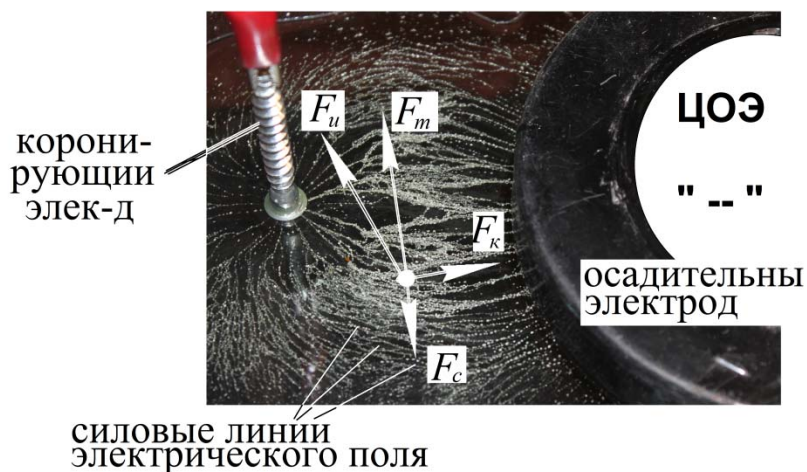


Рис.3. Действующие силы в электрофильтре

Использование подобной конструкции электрофильтра позволяет:

- осуществить постоянство подачи напряжения на электроды, что существенно упрощает систему питания электрофильтра;
- отказаться от процесса встряхивания электродов, что в свою очередь, снижает габаритные и упрощает конструкцию в целом;

– реализовать систему автоматической очистки электродов.

Данная работа будет полезна специалистам занимающимся разработками компактных систем электростатической очистки дымовых выбросов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный доклад. Теплоснабжение Российской Федерации. Пути выхода из кризиса / Б. Ф. Реутов [и др.] / под ред. Семенова В. Г. М.: АНО «РУСДЕМЭнергоЭффект», 2002. 141 с. [ В. F. Reutov, et al, National report. Heat supply of the Russian Federation. Ways out of the crisis. M.: ANO "RUSDEM-EnergoEffect", 2002. ]
2. Пат № 2608402: Вертикальный трубчатый электрофильтр / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, М. В. Охотников, В. Е. Вавилов; опубл. 18.01.2017, Бюл. № 2. [ Pat no. 2608402. Vertical tubular electrofilter / F. R. Ismagilov, I. Kh. Khairullin, M. V. Okhotnikov, V. E. Vavilov; Publ. 18.01.2017, Byul. no. 2. ]
3. Тришкин И. Б. Анализ действия сил в электрофильтре на взвешенную в потоке отработавших газов частицу сажи // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2009. № 3. С. 48– 50. [I. B. Trishkin, "Analysis of the action of forces in the electro-filter on the soot particles suspended in the exhaust gas stream" (in Russian), in Vestnik of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroaternal University named after, V. P. Goryachkin. no. 3. pp. 48-50. 2009.]

*Гусаков Д. В., Меднов А. А.*

Уфимский государственный авиационный технический университет

### **ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С МАГНИТОПРОВОДОМ ИЗ АМОРФНОГО МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА**

*Аннотация:* В статье приведены результаты компьютерного моделирования электромагнитных процессов в трансформаторно-выпрямительном устройстве с магнитопроводом, выполненным из аморфного магнитного материала при двухфазном коротком замыкании. Во введении обоснована актуальность исследований, приведена структурная схема трансформаторно-выпрямительного устройства, применяемого в системах электроснабжения летательных аппаратов. Кратко пояснены теоретические процессы, возникающие при коротком замыкании. Приведены основные конструктивные расчеты и результаты компьютерного моделирования.

*Ключевые слова:* трансформаторно-выпрямительное устройство, аморфный магнитный материал, двухфазное короткое замыкание, аварийный режим работы

По данным Международной ассоциации авиаперевозчиков (IATA), за год выбросы CO<sub>2</sub> от авиаперевозок составляют в целом по миру в среднем 859 млн. тонн, или чуть более 2,5% от общей суммы выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с энергетическим сжиганием топлива. Еще в 2009 году IATA приняла план



постепенного сокращения влияния на атмосферу в авиационной отрасли, который предусматривает плавное уменьшение выбросов CO<sub>2</sub>: к 2050 году уровень должен снизиться на 50% относительно 2005 г. Также ICAO был принят первый в истории глобальный стандарт сертификации выбросов CO<sub>2</sub> от воздушных судов, который устанавливает ограничения в зависимости от размера и веса самолетов [1]. Стандарт заставляет производителей строить воздушные суда с улучшенными показателями энергопотребления, которые позволят уменьшить расход топлива и за счет этого сократить выбросы в атмосферу CO<sub>2</sub>.

В этом направлении движутся все авиационные промышленные предприятия, к примеру, авиакомпания Airbus представила проект развития авиации будущего «Умное небо». По ее прогнозам, к 2050 году будут распространены самолеты с гибридными силовыми установками и электродвигателями - это поможет снизить количество выбросов в атмосферу. По мнению специалистов ЦИАМ [2], применение гибридных силовых установок позволит в будущем уменьшить расход топлива на 70%. Такие перспективы мотивирует многие крупные авиакомпании вкладывать средства в разработку электросамолетов, которые получили название более электрических самолетов (БЭС).

Среди прочего, важными преимуществами разработки концепции БЭС являются более высокая эффективность, более низкие затраты на техническое обслуживание и более тихие системы. Поскольку обычные летательные аппараты оснащены громоздкими гидравлическими, пневматическими и механическими системами, концепция БЭС подразумевает замену этих систем более эффективными и компактными электрическими системами [3]. По сравнению с обычными системами, электрические системы обладают многочисленными преимуществами, такими как более высокая удельная мощность, надежность, ремонтпригодность, удобство обслуживания, производительность и стоимость срока службы. Однако, чем больше электрифицирована авиационная сеть, тем выше становится сложность

энергосистемы. Это оправдывает исследования и инвестиции в новые технологии, которые преследуют эффективные, надежные и компактные альтернативные подходы.

Система электроснабжения БЭС требует различных преобразователей энергии, таких как AC / DC или DC / DC, которые предназначены для подачи энергии на разные нагрузки при разных напряжениях [4]. 115 В переменного тока, ( $\pm$ ) 270 В постоянного тока или 27 В постоянного тока являются общими уровнями напряжения, используемыми для питания нагрузки (рис. 1) [5].

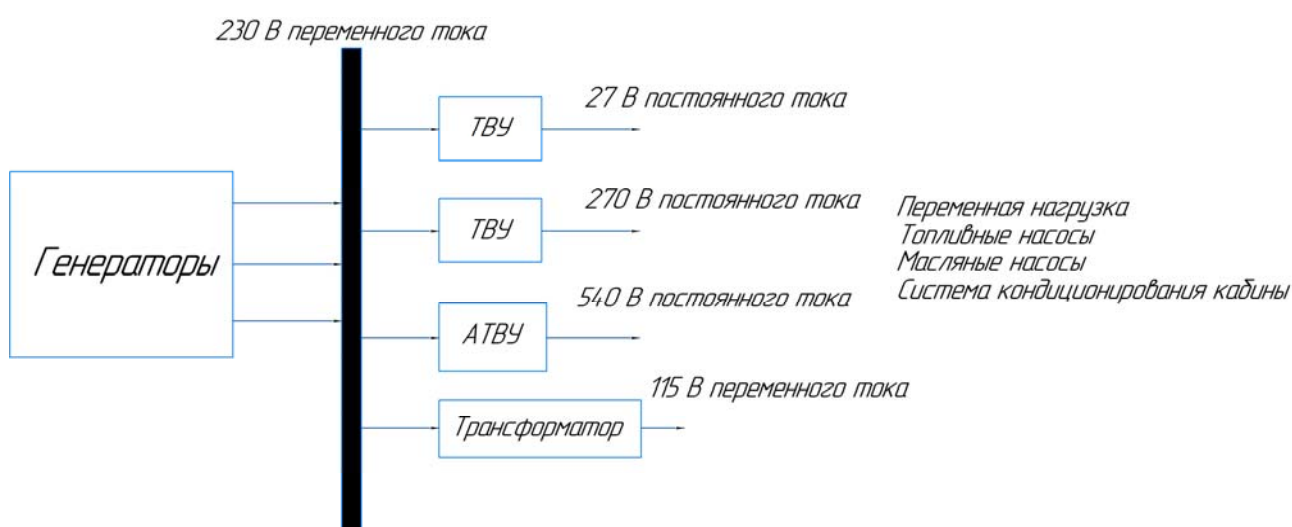


Рис. 1. Пример системы распределения электроэнергии летательного аппарата

Традиционная сеть 270 В постоянного тока разрабатывалась на основе пассивных выпрямительных систем (трансформаторы, трансформаторно-выпрямительные устройства, автотрансформаторно-выпрямительные устройства, реакторы, дроссели и т.д.). Основными преимуществами этих систем являются их невысокая стоимость, высокая надежность и простота управления [6]. Большую часть времени такие устройства работают без нагрузки, что увеличивает потери холостого хода.

Использование металлов с высокой магнитной проницаемостью (например, аморфный магнитный материал) может стать эффективным решением проблемы увеличения потерь электроэнергии [7-9]. Аморфная сталь имеет низкие удельные потери холостого хода особенно при повышенной

частоте тока. На борту летательного аппарата преимущественно применяется частота 400-800 Гц, где применение аморфного магнитного материала наиболее актуально [10-11]. В том числе трансформатор с сердечником из аморфного сплава улучшает экологическую обстановку, снижая потери без нагрузки, что является важным компонентом в энергосбережении и сокращении выбросов CO<sub>2</sub>.

На электрические устройства летательных аппаратов большое влияние оказывают агрессивные условия работы: электромагнитные (влияние электромагнитных полей), климатические (повышенное/понижение значения температуры, давления), механические (вибрация). Это, в свою очередь, вызывает ускоренный процесс старения изоляции обмоток электроустановок, что может приводить к появлению частичных разрядов и коротким замыканиям.

Ток внезапного короткого замыкания  $i_{к \max}$  может достигать двойного значения установившегося тока короткого замыкания и в 20-40 раз превышать номинальное значение тока.

Переходный процесс при внезапном коротком замыкании у трансформаторов малой мощности длится не более одного периода, а у трансформаторов большой мощности - 6-7 периодов. Несмотря на кратковременность процесса короткого замыкания (защитные устройства срабатывают не позднее, чем через 5 с), он представляет собой значительную опасность для обмоток трансформатора. Чрезмерно большой ток короткого замыкания резко повышает температуру обмоток, что может повредить их изоляцию, и резко увеличиваются электромагнитные силы в обмотках трансформатора, что может вызвать значительные механические разрушения в трансформаторе. Поэтому вопрос исследования аварийных режимов работы трансформаторно-выпрямительных устройств летательных аппаратов является актуальным.

Конструктивно ТВУ состоит из трансформатора и выпрямительного блока, структурная схема ТВУ представлена на рис. 2. В качестве магнитопровода трансформатора был выбран сплав 1СР производства Ашинского металлургического завода с магнитной индукцией насыщения 1,6 Тл, относительной магнитной проницаемостью 7000, и удельными потерями холостого хода 33 Вт/кг.

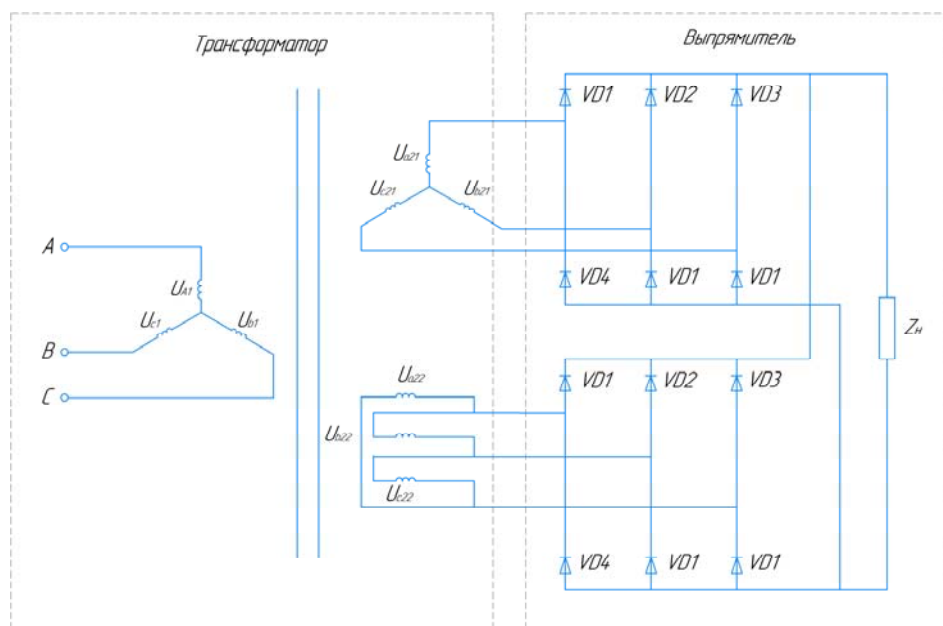


Рис. 2. Структурная схема ТВУ.

Здесь:  $U_A, U_B, U_C$  – напряжение питания;  $U_{a21}, U_{b21}, U_{c21}$  – напряжение вторичных обмоток со схемой соединения «звезда»;  $U_{a22}, U_{b22}, U_{c22}$  – напряжение вторичных обмоток со схемой соединения «треугольник»;  $VD1$ - $VD6$  – диоды;  $Z_n$  – нагрузка

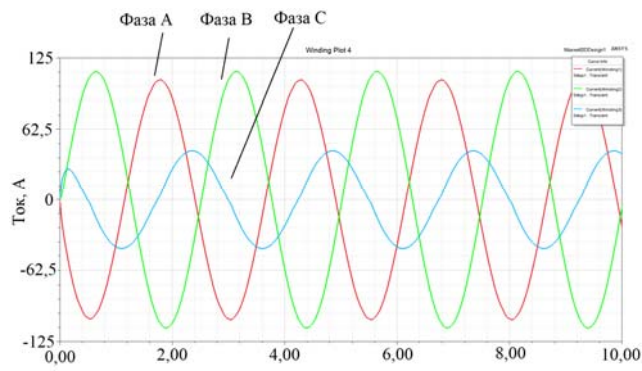
Согласно аналитическим расчетам были определены геометрические и электромагнитные параметры трансформатора ТВУ. Результаты расчета приведены в таблице 1.

По результатам аналитического расчета был разработана четырехмерная компьютерная модель в программной среде *Ansys Maxwell*. Первоначально было проведено моделирование нормальной работы, затем было создано двухфазное короткое замыкание между фазами А и В на вторичной стороне (схема соединения «звезда»). Результаты моделирования электромагнитных процессов в ТВУ с магнитопроводом из аморфного магнитного материала при двухфазном КЗ приведены на рис. 3.

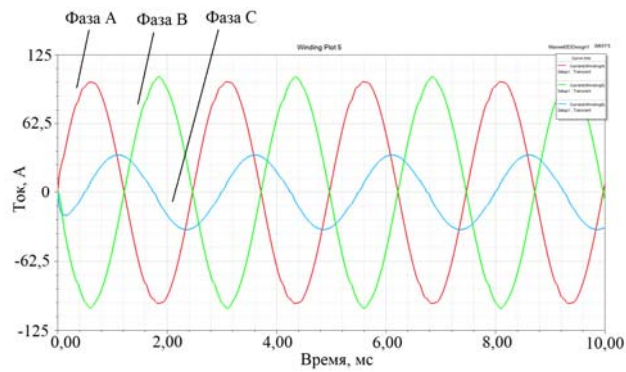
## Результаты расчета трансформатора ТВУ

Параметр	Значение
Мощность, ВА	10500
Первичное напряжение, В	230
Выпрямленное напряжение, В	270
Выпрямленный ток, А	33,33
Частота тока, Гц	400
Вторичное напряжение (схема соединения «звезда»), В	200
Вторичное напряжение (схема соединения «треугольник»), В	115,39
Вторичный ток (схема соединения «звезда»), В	13,61
Вторичный ток (схема соединения «треугольник»), В	7,86
Число витков первичной обмотки	57
Число витков вторичной обмотки (схема соединения «звезда»)	50
Число витков вторичной обмотки (схема соединения «звезда»)	29
Коэффициент заполнения	0,75

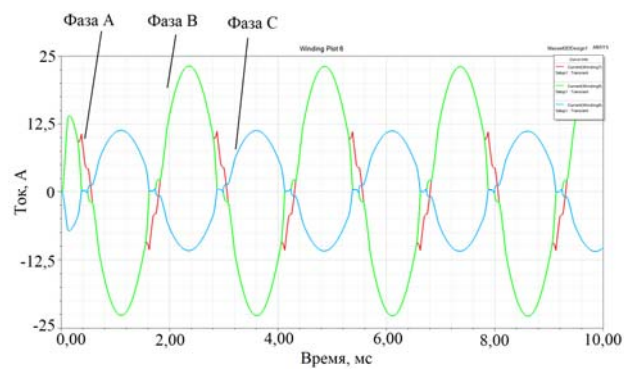
Согласно результатам компьютерного моделирования, вторичные напряжения на стороне «треугольник» изменились (рис. 4): напряжение фазы А уменьшилось на 29%, фазы В не изменилось, фазы С увеличилось на 46%. Первичные токи поменяли свое значение следующим образом: токи фазы А и В увеличились на 277 % каждый, ток фазы С не изменился. Вторичные токи фазы А и В на стороне «звезда» увеличились на 300 % каждый, ток фазы С не изменился.



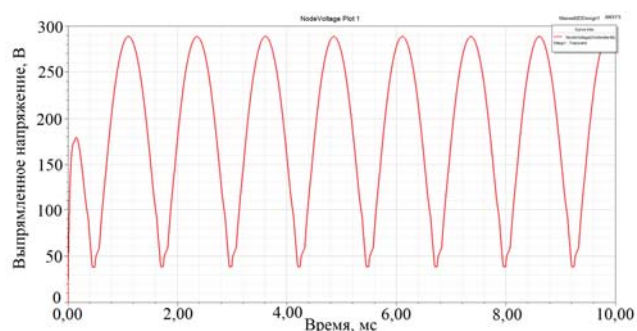
а



б

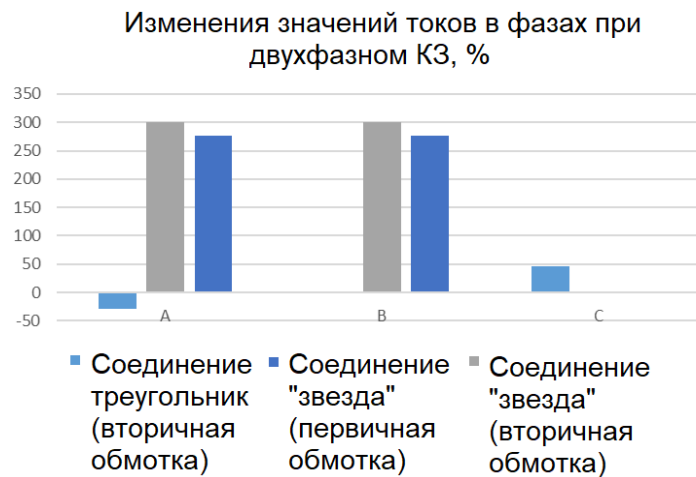


в



г

Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования двухфазного КЗ в ТВУ:  
 а – первичные токи; б – вторичные напряжения на стороне «звезда»; в –  
 вторичные напряжения на стороне «треугольник»; г – выпрямленное напряжение



*Рис. 4.* Изменение значений токов в фазах при коротком замыкании в трансформаторе ТВУ

Разработанная компьютерная модель позволяет проводить исследования различных режимов работы ТВУ и определять значения переменных. Такой подход позволяет прогнозировать развитие аварийных процессов, что, в свою очередь, позволит проводить исследования по предотвращению аварийных режимов работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. <https://www.fontanka.ru/longreads/69671901/>
- [2]. <https://trends.rbc.ru/trends/industry/610812b29a79470df7a3f7b4>
- [3] Unai Atutxa, Asier García, Alejandro Rujas, Daniel Izquierdo, Josefina Meneses, «Comparison of active transformer rectifier unit topologies for more electric aircraft» // The 10th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2020), 15-17 Dec. 2020, DOI: 10.1049/icp.2021.1056.
- [4] R. Liu, L. Xu, Y. Kang, Y. Hui, and Y. Li, “230 VAC/28 VDC high-power density power supply for more electric aircraft applications,” The Journal of Engineering, vol. 2018, no. 13, pp. 499–505, 2018.
- [5] Department of Defense, “MIL-STD-704F: Aircraft Electric Power Characteristics,” United States Department of Defense, Washington, USA, Tech. Rep., 2004.
- [6] U. Borovic, S. Zhao, M. Silva, Y. E. Bouvier, M. Vasic, J. A. Oliver, P. Alou, J. A. Cobos, F. Arevalo, J. C. Garcia-Tembleque, J. Carmena, C. Garcia, and P. Pejovic, “Comparison of three-phase active rectifier solutions for avionic applications: Impact of the avionic standard DO-160 F and failure modes,” ECCE 2016 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Proceedings, 2016
- [7] Gusakov D., Masalimov D. Transformer-rectifier unit of overvoltage 270 V for on-board power supply system of aircraft // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – Ufa, Russia. – 2020.

- [8] Vavilov V. E., Gusakov D.V., Yamalov I. I., Farrakhov D. R., Mednov A. A., Miniyarov A. Kh. Study of a 18-Pulse Transformer–Rectifier Unit with an Amorphous Steel Magnetic Core // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 91. – No. 2. – pp. 104–107.
- [9] Karim Soltanzadeh, Alireza Tavakoli, Parisa Bozorgzad Arbab. Effects of Amorphous core Distribution Transformers in improvement the functioning of the electricity distribution system // 2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution. – Tehran, Iran. – 2012.
- [10] Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Gusakov D.V. High-Efficiency Transformer-Rectifier Unit Design and Experimental Studies // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – Moscow, 2019.
- [11] Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Гусаков Д.В., Меднов А.А. Обоснование целесообразности применения аморфной стали в магнитопроводах трансформаторно-выпрямительных устройств летательных аппаратов // Электричество. –2018. – № 5. – С. 39-44.
- [12] Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Yalalova Z.I., Gusakov D.V., Karimov R.D. Reduction of the Idling Losses of an Eighteen-Pulse Transformer Rectifier Unit for the Aerospace Application // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – P. 1-6.