

**На правах рукописи**



**Иванов Владислав Викторович**

**КООРДИНИРОВАННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА  
СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ  
МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ С ОДНОТИПНЫМИ  
КАНАЛАМИ**

**Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Уфа – 2025**

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» **Кузнецов Игорь Васильевич**

Официальные оппоненты:

**Тяжев Анатолий Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

**Коробков Алексей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится 22 мая 2025 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



А.М. Вульфин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современных условиях развития телекоммуникационных технологий наблюдается рост объема беспроводной передачи данных. Экспоненциальное увеличение количества беспроводных устройств, обусловленное развитием концепции «Интернет вещей» и цифровизацией различных сфер деятельности, создает существенную нагрузку на инфраструктуру связи. Данная тенденция приводит к значительному повышению требований к пропускной способности сетей связи и быстродействию обработки сигналов. В рамках сказанного, особую актуальность приобретает проблема энергопотребления, которая становится критическим фактором в контексте масштабирования автономных беспроводных сетей.

Для решения указанной проблемы разрабатываются и применяются различные энергосберегающие методы, направленные на оптимизацию энергопотребления различных уровней взаимодействия систем связи:

1. Сетевые методы маршрутизации и управления трафиком для минимизации временных задержек и энергозатрат на коммутацию.
2. Системные методы оптимизации архитектуры и топологии сетей связи.
3. Физические энергосберегающие методы модуляции, технологии мультиплексирования и управления спектром передачи данных.
4. Методы снижения абсолютной и относительной скоростей передачи данных с помощью кодирования источника сообщений.

С практической точки зрения большой интерес представляют методы снижения скорости передачи данных на основе кодирования сообщений. Эти методы позволяют снизить энергопотребление с сохранением существующей инфраструктуры или ее минимальными изменениями, так как многие ее подзадачи решаются на программном (виртуальном) уровне. Среди множества методов кодирования можно выделить дифференциальные (предиктивные) методы. Эти методы занимают значительное место в современных инфокоммуникационных системах и обладают минимальными временными задержками на обработку сигналов.

Однако существующие дифференциальные методы не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к автономным многоканальным инфокоммуникационным системам, в частности, к устройствам «Интернета вещей», так как они обрабатывают сообщения с массивов датчиков, зачастую, в режиме реального времени, где требуются минимальные задержки на их обработку. Существующие методы, предназначенные для одноканальных систем связи, не в полной мере удовлетворяют требованиям по быстродействию и энергоэффективности, особенно в условиях нестационарности параметров сигналов.

В условиях нестационарных процессов, характеризующихся, в частности, параметрической неопределённостью, становится особенно очевидной необходимость совершенствования систем эффективного кодирования. Традиционные методы модуляции и кодирования оказываются плохо приспособленными к таким условиям, что приводит к снижению эффективности систем связи и увеличению их энергопотребления.

С учетом перечисленного, можно сформировать **научную задачу**, заключающуюся в необходимости повышения эффективности автономных инфокоммуникационных систем путем разработки новых алгоритмов эффективного кодирования.

**Степень разработанности темы.** В ходе диссертационного исследования для решения поставленных задач были использованы труды отечественных и зарубежных учёных. Существенный вклад в развитие идей данного направления исследований внесли отечественные учёные, рассмотревшие общие вопросы построения беспроводных сетей: Тихонов В.И., Сосулин Ю.Г., Шахнович И.В., Гольденберг Л.М., Цейтлин Я.М., Кловский Д.Д., Котельников В.А., Финк Л.М. Колмогоров А.Н. и др. Среди зарубежных учёных можно выделить фундаментальные труды по теории информации и кодирования Шеннона К., Винера Н., Вернера М., Галлагера Р., Калмана Р.Э., Катлера К.Ч. Последний представил дифференциальную импульсно-кодую модуляцию (ДИКМ). Однако, существующие реализации ДИКМ применяются в одноканальных системах или требуют проведения сложных вычислений в случае использования в многоканальных системах.

В качестве дальнейшего развития ДИКМ можно рассматривать использование координированного дифференциального преобразователя (КДП), в котором сжатие динамического диапазона происходит не только на основе автокорреляционных характеристик канального сигнала, но и на основе корреляции между каналами многоканальной системы. Основное отличие КДП заключается в использовании единственного координированного предсказателя во всех каналах многоканальной системы, что снижает вычислительную сложность за счет исключения решения оптимизационной задачи. Кроме того, структура КДП предлагает перспективы для модернизации путём интеграции методов адаптации к динамике характеристик входных сигналов в режиме реального времени, что позволит оптимизировать производительность системы в условиях параметрической неопределённости и приблизиться к решению проблемы энергосбережения.

Таким образом, задача повышения эффективности кодирования источника в автономных многоканальных системах передачи на основе метода координированного предсказания сигналов является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

**Объект исследования.** Системы передачи данных автономных многоканальных систем связи.

**Предмет исследования.** Процессы преобразования сигналов в координированных дифференциальных преобразователях, обеспечивающих снижение скорости передачи множественной информации.

**Цель работы.** Повышение эффективности кодирования сообщений в автономных инфокоммуникационных системах на основе координированной дифференциальной обработки однотипных первичных сигналов.

**Задачи исследования:**

1. Разработать структурную схему координированного дифференциального преобразователя с однотипными подсистемами и голономными межканальными связями, функционирующими в условиях параметрической неопределенности.

2. Разработать алгоритмы синтеза и анализа передающей части координированного дифференциального преобразователя в условиях параметрической неопределенности.

3. Разработать алгоритмы синтеза приемной части координированного дифференциального преобразователя и его элементов в условиях параметрической неопределенности.

4. Разработать варианты построения координированного дифференциального преобразователя для применения в устройствах «Интернета вещей» и исследовать их эффективность.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана структурная схема приемо-передающего тракта многоканальной инфокоммуникационной системы предиктивного эффективного кодирования сообщений, *основанная* на рассмотрении как многосвязной системы с голономными межканальными связями и *отличающаяся* применением координированной дифференциальной обработки сигналов однотипных каналов, *позволяющая* снизить динамический диапазон первичных сигналов и вычислительную сложность их обработки с сохранением требуемого качества связи.

2. Разработан алгоритм синтеза передающей части координированного дифференциального преобразователя, *отличающийся* применением частотного метода для определения его параметров, сложность которого не зависит от порядка дифференциального уравнения фильтров предсказателя, и *позволяющий* учитывать изменяющиеся во времени свойства обрабатываемых сообщений.

3. Разработан метод построения беспоисковой самонастраивающейся приемной части координированного дифференциального преобразователя, *основанный* на рассмотрении как активной системы адаптации первого уровня, *позволяющий* на основе принимаемых разностных сигналов определить требуемые для корректного восстановления информации параметры схемы

приемника и *исключить* необходимость передачи дополнительной служебной информации в канале управления.

4. Разработан алгоритм построения поисковой (активной) приемной части координированного дифференциального преобразователя *на основе* многомерной оптимизации с использованием метода градиентного спуска, *позволяющий* адаптировать шаг дискретизации экстраполятора приемника в некогерентном режиме.

**Теоретическая и практическая значимость.** Предложены новые структурные решения построения передающей и приемной частей системы КДП в условиях параметрической неопределенности, а также разработаны алгоритмы их синтеза и анализа. С практической точки зрения использование КДП позволяет уменьшить количество передаваемых информационных бит с сохранением требуемого качества связи. Также разработанные алгоритмы могут лежать в основе управления квазистационарными процессами обработки сигналов в адаптивных кодирующих устройствах.

**Методология и методы исследования.** Результаты работы получены на основе теории электрической связи, теории случайных процессов, теории функции комплексной переменной, теории автоматического управления и системного анализа. Использованы методы математического моделирования с использованием программных пакетов языка программирования Python.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Структурная схема координированного дифференциального преобразователя с однотипными каналами и голономными межканальными связями, функционирующими в условиях параметрической неопределенности.

2. Алгоритмы синтеза и анализа передающей части координированного дифференциального преобразователя в условиях параметрической неопределенности.

3. Алгоритмы синтеза приемной части координированного дифференциального преобразователя и его элементов в условиях параметрической неопределенности.

4. Варианты построения координированного дифференциального преобразователя для применения в устройствах «Интернета вещей» и результаты экспериментальной оценки их эффективности.

**Обоснованность и достоверность результатов диссертации.** Использование известных теоретических положений, корректности используемых математических моделей и их соответствия реальным физическим процессам.

**Апробация результатов.** Основные теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались и обсуждались на 7 международных и всероссийских научно-технических конференциях: XVI Всероссийская молодежная научная конференция «МАВЛЮТОВСКИЕ

ЧТЕНИЯ», Уфа, 2022; Международная Урало-Сибирская конференция по биомедицинской инженерии, радиоэлектронике и информационным технологиям, Екатеринбург, 2022; XXIV Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2022; XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ», Санкт-Петербург, 2023; IX Международная конференция «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ», Самара, 2023; X Международная заочная научно-техническая конференция «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2023)», Тольятти, 2023; Международная Урало-Сибирская конференция по биомедицинской инженерии, радиоэлектронике и информационным технологиям, Екатеринбург, 2023.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 2 в научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus (Q2 и Q3), 9 работ в сборниках трудов и материалах конференций (из которых 3 труда входят в базу цитирования Scopus). Получены 3 результата интеллектуальной деятельности: 2 патента на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Соответствие паспорту специальности.** Результаты диссертационной работы соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.2.15. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: п. 3. Исследование процессов представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио-, голографической и мультимедиа информации; разработка и совершенствование соответствующих алгоритмов и процедур; п. 8. Исследование проблем построения, планирования и проектирования высокоплотных и сверх плотных сетей для обеспечения реализации приложений Интернета Вещей и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей.

**Личный вклад.** Все основные результаты – структурные решения (схемы), математические модели и алгоритмы, представленные в работе, разработаны автором лично в процессе научной деятельности. Проработка цели и задач, способов их решения и вариантов представления результатов осуществлены автором самостоятельно.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Общий объем составляет 153 стр., основной текст 127 стр., в том числе рисунков – 27, таблиц – 4, список литературы из 125 наименований на 14 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая ценность выносимых на защиту результатов.

**В первой главе** проведён анализ методов эффективного кодирования сообщений и их применения в устройствах «Интернета вещей» (англ. Internet of Things). Определены и систематизированы ключевые показатели и метрики оценки эффективности систем связи. Проведена классификация методов повышения эффективности систем связи с точки зрения пропускной способности и энергопотребления. В ходе анализа было установлено, что в системах связи, где данные характеризуются высокой степенью временной или пространственной избыточности, наиболее целесообразно использовать методы дифференциальной обработки сигналов с целью повышения эффективности систем связи. Этот подход особенно актуален для сетей «Интернета вещей». Были рассмотрены сценарии применения дифференциальной обработки сигналов, направленные на оптимизацию работы систем связи, а также области применения предиктивного кодирования.

Одним из методов реализации энергоэффективного кодирования в системах связи является дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ), а также её модификации, обладающие потенциалом для модернизации с целью повышения энергоэффективности многоканальных систем связи.

При изучении существующих подходов дифференциальной обработки сигналов было выявлено, что существующие методы не в полной мере удовлетворяют требованиям для автономных многоканальных инфокоммуникационных систем, в частности систем «Интернета вещей». Особенно следует выделить общий недостаток методов, рассчитанных на одноканальность систем связи, стационарность обрабатываемых сигналов и отсутствие учета свойств межканальной корреляции. В связи с этим возникает необходимость в разработке и внедрении новых подходов к обработке данных, применяемых в многоканальных системах связи.

На основании вышесказанного были сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** разработаны структурная схема КДП (рис. 1), а также алгоритмы синтеза и анализа его передающей части.



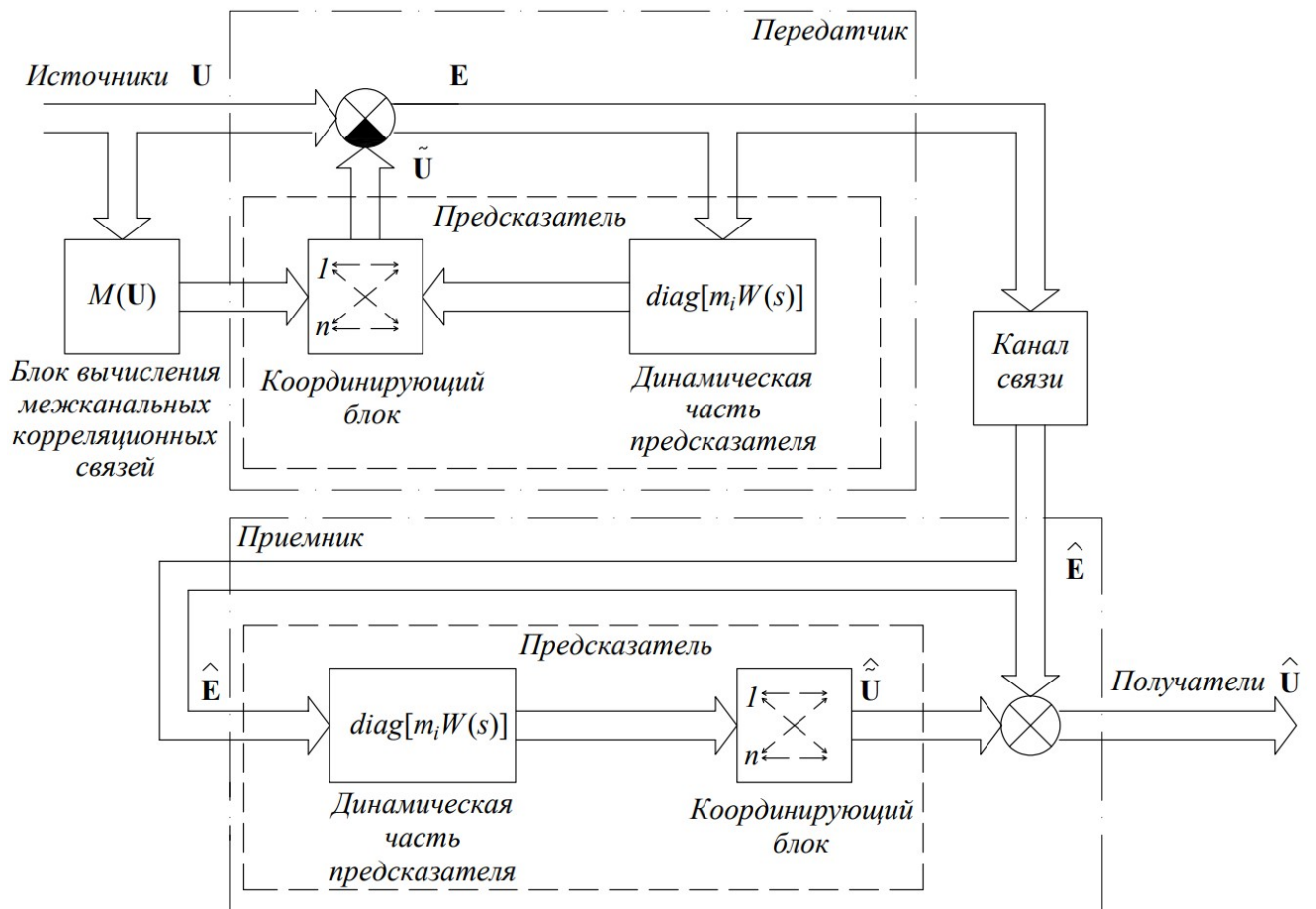


Рисунок 1 – Структура приемо-передающего тракта многоканальной системы предиктивного эффективного кодирования с использованием координированного дифференциального преобразователя

На входы передающей части системы КДП и блок вычисления межканальных корреляционных связей поступают первичные нестационарные сигналы  $u_i(t)$ , где  $i = 1, \dots, n$ , образующие вектор входных воздействий  $\mathbf{U} = [u_1, \dots, u_n]^T$  ( $T$  – оператор транспонирования). На элементах сравнения вычисляются ошибки предсказания (разностные сигналы)  $e_i(t)$ , образующие вектор  $\mathbf{E} = [e_1, \dots, e_n]^T$ , где  $\mathbf{E} = \mathbf{U} - \tilde{\mathbf{U}}$ , где  $\tilde{\mathbf{U}}$  – вектор предсказанных значений сигналов, формируемый предсказателем. Значения вектора  $\mathbf{E}$  передаются в канал связи. Для получения выигрыша в энергоэффективности необходимо, чтобы модули разностных канальных сигналов были меньше по амплитуде, чем соответствующие исходные сигналы, т.е.  $|e_i(t)| < |u_i(t)|$ . Структурно предсказатель включает динамическую часть и координирующий блок. Динамическая часть предсказателя реализуется перестраиваемыми во времени экстраполяторами, фильтрами взвешивания, предсказания, эквалайзерами и т.д. Математическая модель динамической части предсказателя рассматривается как подсистема с однотипными элементами, которая описывается диагональной матричной передаточной функцией  $\text{diag}W(s)_{n \times n}$ , где элемент  $W(s)$  представляет собой устойчивую физически реализуемую минимально-фазовую передаточную функцию,  $s$  – комплексная переменная Лапласа. Отличительной особенностью КДП является использование в предсказателе координирующего блока,

математическую модель которого можно представить в виде нестационарной матрицы  $\mathbf{K}(\tau)=[k_{ij}]_{n \times n}$ ,  $\tau \in [0, T_{max}]$  голономных связей, где  $k_{ij}(\tau)$  ( $i \neq j$ ) – известные элементы корреляционной функции межканальной связи, вычисляемые в блоке вычисления межканальных связей. На главной диагонали  $\mathbf{K}(\tau)$  располагаются коэффициенты  $k$  (т.е. коэффициенты усиления для аналоговых систем или коэффициенты умножения для цифровых) сепаратных каналов и подлежат определению,  $T_{max}$  – граница интервала наблюдения. При этом понятие голономности применяется не в механическом, а в математическом смысле, и подразумевает систему, в которой связи между входом и выходом описываются без применения интегро-дифференциальных уравнений.

В силу голономности межканальных связей можно считать, что времязависимая матрица  $\mathbf{K}(\tau)$  будет интервальной, т.е.  $\mathbf{K}(\tau) \in \{\mathbf{K}, \bar{\mathbf{K}}\}$ , где:  $\bar{\mathbf{K}} \in [\bar{k}_{ij}]_{n \times n}$ , при  $i \neq j$ ,  $\mathbf{K} \in [\underline{k}_{ij}]_{n \times n}$ , при  $i \neq j$  – предельная верхняя и нижняя границы значений корреляционных функций  $k_{ij}(\tau)$  ( $i \neq j$ ), соответственно. Значения элементов матриц  $\mathbf{K}(\tau)$  могут быть определены максимальными и минимальными значениями функции  $k_{ij}(\tau)$  на интервале  $\tau \in [0, T_{max}]$ .

Следовательно, задача синтеза системы КДП связана с определением  $k$  главной диагонали  $\mathbf{K}(\tau)$ . Алгоритм синтеза:

1. Определяется характеристическое уравнение передающей части системы:

$$d(h(\tau), \Phi(k, s)) = 1 + \frac{h_2(\tau)}{k^2} \Phi^2(k, s) + \frac{h_3(\tau)}{k^3} \Phi^3(k, s) + \frac{h_n(\tau)}{k^n} \Phi^n(k, s) = 0, \quad (1)$$

где  $d(*)$  – характеристический полином;  $\Phi(k, s)$  – вспомогательная функция,  $h_m(\tau)$  – характеристики связи между  $m$  сепаратными каналами через координирующую матрицу, определяющиеся по формулам:

$$h_m(\tau) = \sum_{i,j,\dots,l=1}^{C_n^m} \frac{h_{i,j,\dots,l}(\tau)}{m}; \quad \frac{h_{i,j,\dots,l}(\tau)}{m} = \frac{\det \|k_{ij}(\tau) \gamma_{ij}\|_{m \times m}}{\det \|k_{ij}(\tau) \delta_{ij}\|_{m \times m}}; \quad m = \overline{2, n},$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1, & i \neq j, \end{cases} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$$

где  $\gamma_{ij}, \delta_{ij}$  символы Кронекера.

Для обеспечения устойчивости корни  $\eta$  уравнения (1) должны располагаться вне границе АФХ  $\Phi(k, j\omega)$ , где  $j$  – комплексная единица,  $\omega$  – циклическая частота. (рис. 2) согласно утверждению Кабального-Ильясова-Колышева.

2. Потребуем расположения корней  $\eta$  уравнения (1) вне окружности радиуса  $R$ , т.е.  $R > |\Phi(k, j\omega)|$  для всех  $\omega$  (рис. 2). Вышесказанное можно свести к конформному отображению вида:  $\Phi(k, s) \leq \eta = R \frac{1-\lambda}{1+\lambda}$ , где  $R = 1$ ,

$\lambda$  – комплексная переменная, при котором устойчивость передающей части обусловлена левым расположением переменных  $\lambda$  уравнения:

$$1 + \frac{h_2(\tau)}{k^2} \left( \frac{1-\lambda}{1+\lambda} \right)^2 + \frac{h_3(\tau)}{k^3} \left( \frac{1-\lambda}{1+\lambda} \right)^3 + \dots + \frac{h_n(\tau)}{k^n} \left( \frac{1-\lambda}{1+\lambda} \right)^n = 0 \quad (2)$$

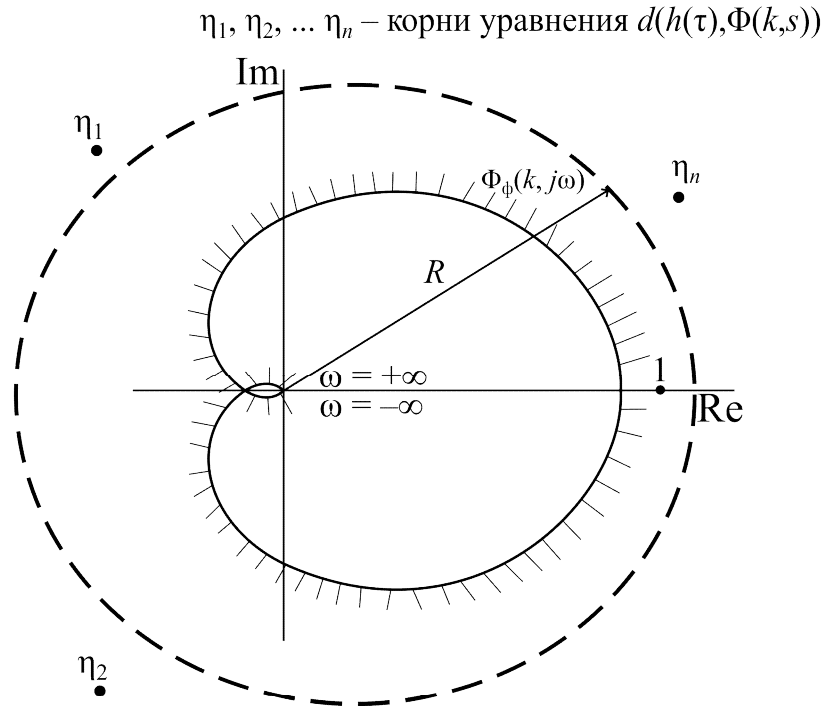


Рисунок 2 – Годограф КДП

3. По отношению к уравнению (2) применяются известные алгебраические и частотные критерии устойчивости и определяется  $k$ , исходя из качества переходных процессов для всего множества изменения  $h(\tau)$ .

Для обеспечения монотонного характера переходных процессов был предложен алгоритм синтеза передающей части системы КДП с амплитудным ограничением сигналов ее динамической части. Задача заключалась в определении параметров нелинейного элемента  $F(x) = K_{нэ}x$  (где  $K_{нэ}$  – коэффициент усиления) и величины  $|b|$ , являющейся уровнем ограничения сигнала.

Для решения поставленной задачи была разработана передающая часть КДП, дополненная амплитудным ограничителем. Определено предельное значение величины  $|b|$  на основе критерия абсолютной устойчивости Попова. После проведения конформного отображения (по аналогии с (2)) была определена граница области устойчивости передающей части системы КДП. Проведена проверка на отсутствие автоколебаний.

Также был модифицирован алгоритм оценки статической точности передающей части линейной системы КДП, позволяющий оценить разрядность и размер кодового слова передаваемого сообщения от глубины изменяющейся по времени межканальной линейной зависимости (корреляции) входных сигналов  $N_{(\max)} = \max \text{Log}_2(e_{\text{уст}}(t)) + 1$ , где  $e_{\text{уст}}(t)$  – разностные сигналы в установившемся режиме.

**В третьей главе** представлена разработка моделей приемной части КДП в условиях параметрической неопределенности, где была учтена нестационарность искажающих факторов, свойств передаваемого сигнала и параметров координирующего блока.

Были разработаны модели приемной части, не предусматривающие организацию служебных дополнительных каналов связи, для следующих вариантов: детерминированная модель, модель без поиска и поисковая модель.

Усреднённая динамическая модель канала была определена через передаточную функцию эквалайзера-компенсатора. Передаточная функция определена из условия минимума функционала, который представляет собой дисперсию динамических свойств замкнутой системы. Решение задачи минимизации приводит к выражению для передаточной функции как среднего геометрического предельных значений системы. Элементы матрицы  $\mathbf{K}(\tau)$  заменяются их математическими ожиданиями, где весовые коэффициенты определяют вклад в усреднение.

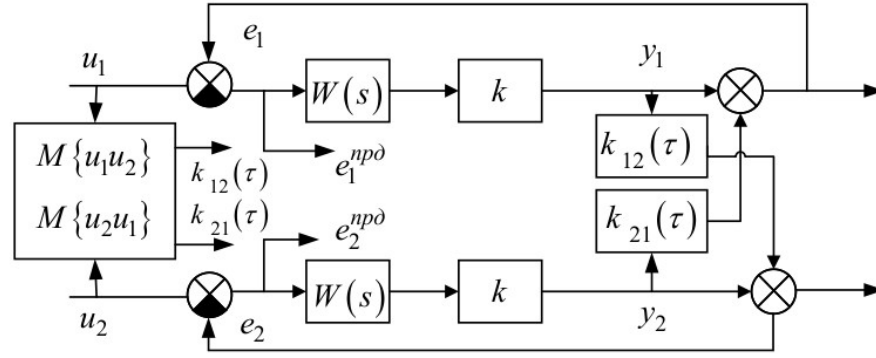
Преимущество данного метода заключается в отсутствии требования инициализации при минимальном количестве начальной установки, однако недостатком является низкая точность оценки приемного сигнала (управление точностью осуществляется через изменение  $k$ ).

Разработан метод построения беспойскового самонастраивающегося приемника системы КДП, которую можно классифицировать как активную систему адаптации первого уровня. Приведен пример упрощенной 2-канальной системы КДП с беспойсковым самонастраивающимся приемником. При этом вводятся допущения: стационарность динамической части предсказателя, когерентность функционирования передающей и приемной частей, а также идеальность канала связи. Эти допущения позволяют сосредоточиться на ключевых аспектах адаптации приемника к параметрической неопределенности.

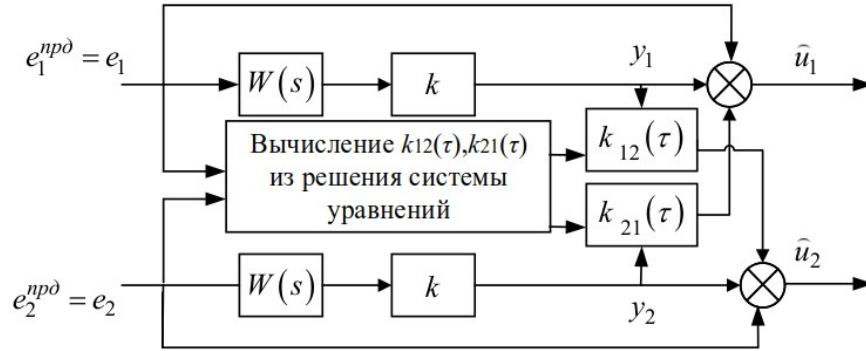
**Дано:** структурная схема приемопередатчика системы КДП (рис. 3). Требуется по известной структуре принимаемых сигналов определить коэффициенты вне главной диагонали координирующего блока. **Решение:** искомые коэффициенты  $k_{12}(\tau)$  и  $k_{21}(\tau)$  (аргумент времени  $\tau$  в выражении ниже опущен) определяются системой линейных уравнений:

$$\begin{aligned} u_1 = \hat{u}_1 &= y_1 + e_1 + k_{21}y_2; \quad u_2 = \hat{u}_2 = y_2 + e_2 + k_{12}y_1; \\ \begin{cases} k_{21}k_{12}M\{y_2y_1\} - k_{12}[1 - M\{y_1y_1\} - M\{e_1y_1\}] + k_{21}[M\{y_2y_2\} + \\ + M\{y_2e_2\}] + [M\{y_1y_2\} + M\{y_1e_2\} + M\{e_1y_2\} + M\{e_1e_2\}] = 0; \\ k_{12}k_{21}M\{y_1y_2\} - k_{21}[1 - M\{y_2y_2\} - M\{e_2y_2\}] + k_{12}[M\{y_1y_1\} + \\ + M\{y_1e_1\}] + [M\{y_2y_1\} + M\{y_2e_2\} + M\{e_2y_1\}] + M\{e_2e_1\} = 0, \end{cases} \end{aligned}$$

где  $y_1, y_2$  внутрисистемные сигналы,  $e_1, e_2$  – каналные сигналы,  $u_1 = \hat{u}_1, u_2 = \hat{u}_2$  – входные сигналы и сигналы оценки соответственно,  $M\{\cdot\}$  – операция вычисления взаимокорреляционной функции.



Передающая часть КДП



Приемная часть КДП

Рисунок 3 – Двухканальная структурная схема приемопередатчика системы КДП

Для учета указанных допущений был разработан алгоритм построения поискового самонастраивающегося приемника системы КДП. Необходимо определить коэффициенты взаимосвязи  $k_{12}$ ,  $k_{21}$  и вариацию шага дискретизации  $T$  из условия минимума функционала  $J$ :

$$J(k_{12}, k_{21}, \delta T) = \min \{ J_1(k_{12}, k_{21}, \delta T) + J_2(k_{12}, k_{21}, \delta T) \},$$

$$J_1(k_{12}, k_{21}, \delta T) = [k_{21}k_{12}M\{y_2^*y_1^*\} - k_{12}[1 - M\{y_1^*y_1^*\} - M\{e_1y_1^*\}] + k_{21}[M\{y_2^*y_2^*\} + M\{y_2^*e_2\}] + [M\{y_1^*y_2^*\} + M\{y_1^*e_2\} + M\{e_1y_2^*\} + M\{e_1e_2\}]]^2$$

$$J_2(k_{12}, k_{21}, \delta T) = [k_{12}k_{21}M\{y_1^*y_2^*\} - k_{21}[1 - M\{y_2^*y_2^*\} - M\{e_2y_2^*\}] + k_{12}[M\{y_1^*y_1^*\} + M\{y_1^*e_1\}] + [M\{y_2^*y_1^*\} + M\{y_2^*e_2\} + M\{e_2y_1^*\} + M\{e_2e_1\}]]^2,$$

$$y_{1,2}^*(\tau) = y_{1,2}(\tau) + \Delta y_{1,2}(\tau) = y_{1,2}(\tau) + \delta T e_{1,2}(\tau - \Delta T_0),$$

где  $\Delta y_{1,2}(\tau) = \delta T e_{1,2}(\tau - \Delta T_0)$  – решение задачи, которое основывается на методе градиентного спуска с постоянным шагом, с дроблением шага, наискорейшего и покоординатного спуска Гаусса-Зейделя. Была разработана блок-схема определения параметров самонастраивающегося приемника системы КДП (рис. 4).

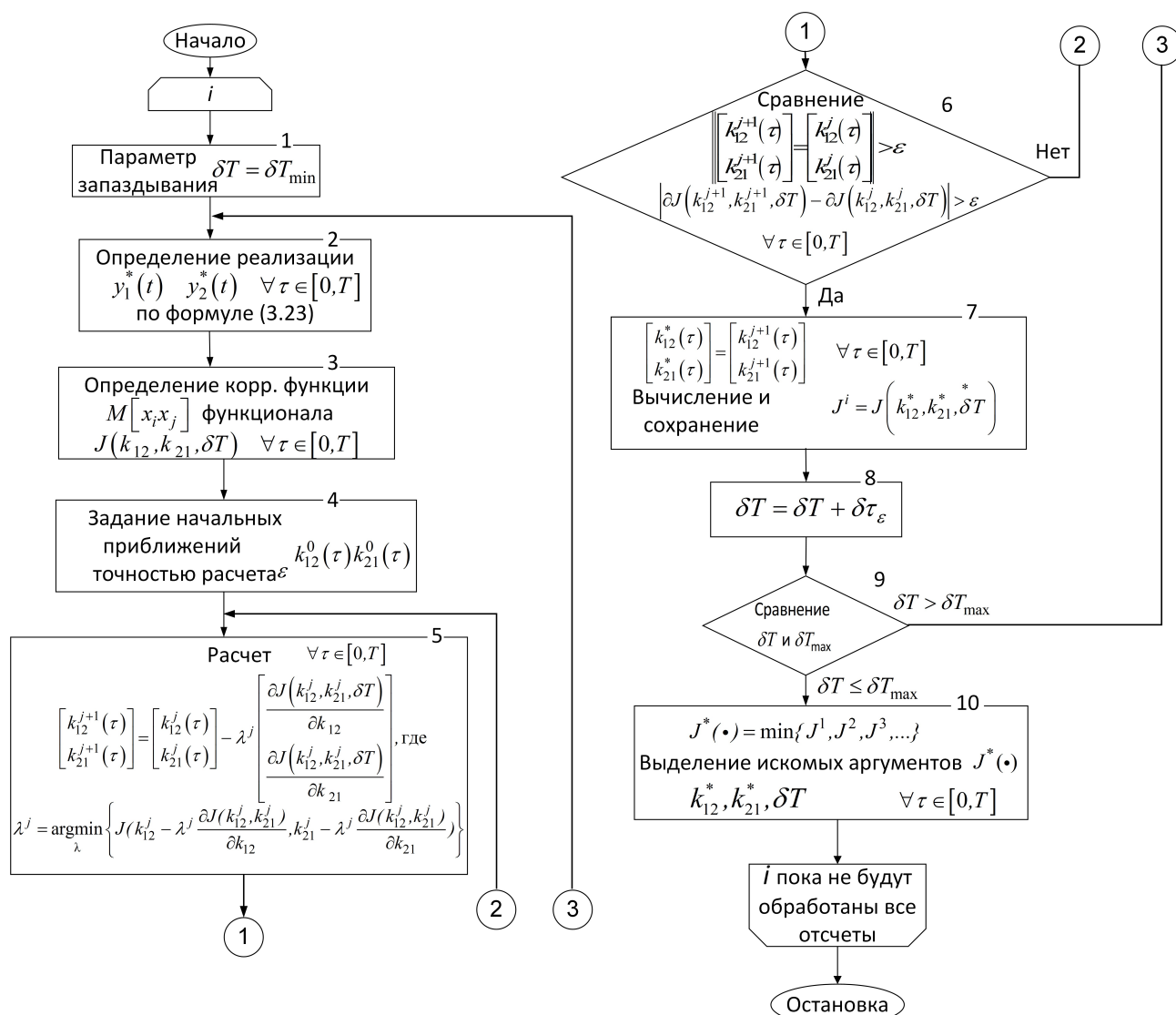


Рисунок 4 – Блок-схема определения параметров самонастраивающегося приемника системы КДП

Был приведен подход к расчету передаточной функции оптимального фильтра  $W_{\text{ф}}(s)$  системы КДП в условиях параметрической неопределенности. Допущения: а) сигналы квазистационарны – время их существования можно искусственно продлить за пределы наблюдения; б) значения автокорреляционной функции укладываются «в трубку точности» предельных значений нижней и верхней автокорреляционных функций «аппроксимирующих» исходный сигнал некоторыми стационарными случайными процессами.

Передаточная функция оптимального фильтра определяется через спектральную плотность ошибки и предусматривает процедуру сепарации, которая обеспечивает расположение полюсов в левой полуплоскости комплексной плоскости. Итоговая функция учитывает взвешенные спектральные плотности нижней и верхней границ системы.

В четвёртой главе представлены варианты построения КДП и результаты их экспериментального исследования в системах «Интернета вещей». Описаны эксперимент и оценка эффективности сжатия низкоскоростных сенсорных и

высокоскоростных мультимедийных данных с использованием КДП, а также процесс реализации вариантов построения КДП в системах «Интернета вещей».

Эксперимент включал в себя сбор данных с датчиков освещенности и температуры, их обработку и анализ результатов. Оценка полученных результатов показала высокую эффективность предложенного метода: для низкоскоростных сигналов – достигнуты коэффициенты сжатия от 2 до 64 раз при изменении коэффициента прямой передачи от 2 до 200, при этом метрика RMSE (англ. Root Mean Square Error – среднеквадратичная ошибка) изменялась от 1,26 до 46,66 для высококоррелированных данных (от 2,78 до 63,33 для низкоррелированных данных), а ENOB (англ. Effective Number of Bits – эффективное количество бит) от 12 до 6 для 12-разрядного АЦП.

Качество восстановления, зависящее от степени межканальной корреляции, при этом было соизмеримо с существующими аналогами, а задержка на обработку сигналов КДП составила порядка сотен микросекунд (против сотен миллисекунд у аналогов). Энергоэффективность по метрике бит/Джоуль системы повысилась на 33%.

Кроме того, была выявлена высокая чувствительность КДП к уровню корреляции между каналами и автокорреляции сигналов. При обработке данных, которые характеризуются более высокой степенью межканальной корреляции, можно достичь более высокого качества восстановления исходной информации при том же коэффициенте сжатия по сравнению с данными, которые имеют менее выраженную взаимную корреляцию.

Также был предложен алгоритм сжатия изображений на основе предварительной кластеризации, который позволяет повысить эффективность работы КДП в условиях высокой корреляции между каналами цветности изображений и высокой пространственной частоты изображений. Применение КДП для сжатия изображений позволило добиться десятикратного уменьшения объема данных без заметных потерь в качестве. В результате было получено значение нормы Минковского, превосходящее аналогичные показатели, достигаемые при использовании алгоритма JPEG с той же степенью компрессии.

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В диссертационной работе были рассмотрены вопросы эффективного кодирования сообщений многоканальных систем связи с однотипными каналами на основе координированной дифференциальной обработки сигналов с целью повышения эффективности кодирования сообщений, а именно снижения динамического диапазона и временной задержки на обработку сигналов сенсорных и мультимедийных данных.

1. Предложена новая структурная схема координированного дифференциального преобразователя с однотипными каналами и голономными межканальными связями, функционирующими в условиях параметрической неопределенности, позволяющая снизить динамический диапазон первичных

сигналов и вычислительную сложность их обработки с сохранением требуемого качества связи.

2. Разработан алгоритм синтеза многоканального координированного дифференциального преобразователя на основе совмещения интервального подхода с модифицированным методом анализа устойчивости однотипных систем, позволяющий синтезировать кодек координированного дифференциального преобразования без решения оптимизационной задачи. Разработанный алгоритм синтеза модифицирован за счет применения амплитудного ограничения сигналов на выходе динамической части предсказателя, что позволяет устранить эффект перерегулирования.

3. Разработана схема «усредненного» приемника с детерминированными параметрами координированного дифференциального преобразователя, которую можно классифицировать как робастную систему с пассивной адаптацией, позволяющая восстановить принятые сигналы без организации служебных каналов связи. Разработан метод построения беспойскового самонастраивающегося приемника координированного дифференциального преобразователя, позволяющий восстановить межканальные связи исходя из канальных сигналов. Разработан алгоритм построения поискового самонастраивающегося приемника координированного дифференциального преобразователя, позволяющий учитывать свойства реального канала связи.

4. Разработаны варианты построения координированного дифференциального преобразователя в рамках технологии «Интернета вещей» для сенсорных и мультимедийных данных и проведено экспериментальное исследование их эффективности. В ходе экспериментального исследования показано, что использование координированного дифференциального преобразования для обработки сенсорных данных позволяет получить коэффициенты сжатия от 2 до 64 раз при качестве восстановления по метрике RMSE от 1,26 до 46,66 для высококоррелированных данных (от 2,78 до 63,33 для низкоррелированных данных). Энергоэффективность по метрике бит/Джоуль системы повысилась на 33% при использовании 12-разрядного АЦП. Сжатие изображений было осуществлено в 10 раз без значительных потерь в качестве. Применение координированного дифференциального преобразования для сжатия изображений обеспечивает восстановление с более высоким значением нормы Минковского по сравнению с алгоритмом JPEG более чем на 35% при сохранении той же степени сжатия.

Результаты диссертационного исследования приняты **к внедрению** в производственные процессы компании АО «БПО «Прогресс» г. Уфа, а также в учебные процессы ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и техники».

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** В дальнейшей работе планируется расширить постановку задачи методами интервальной арифметики (арифметика Каухера и др.), использовать нелинейную обработку с элементами машинного обучения для предсказания нестационарных сигналов, а также адаптировать и внедрить разработанную систему эффективного кодирования в



существующие стандарты систем обработки видеопотока с целью повышения их конкурентоспособности на рынке систем «Интернета вещей».

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых журналах из списка ВАК**

1. Оценка эффективности применения преобразования групповых сигналов в сенсорных сетях / В. В. Иванов, Г. С. Воронков, Е. А. Лопухова, И. В. Кузнецов // Инфокоммуникационные технологии. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 58-64.

2. Иванов, В. В. Алгоритм синтеза нестационарного координированного многоканального кодека на основе построения интервальных однотипных многосвязных систем / В. В. Иванов, Г. С. Воронков, И. В. Кузнецов // Информационно-управляющие системы. – 2023. – № 5(126). – С. 22-32.

### **В журналах, индексируемых в международных базах WoS/Scopus**

3. Lopukhova E. et al. A Novel Energy-Efficient Coding Based on Coordinated Group Signal Transformation for Image Compression in Energy-Starved Systems //Applied Sciences. – 2024. – Т. 14. – №. 10. – С. 4176.

4. Lopukhova EA, Voronkov GS, Kuznetsov IV, Ivanov VV, Kutluyarov RV, Sultanov AKh, Grakhova EP. Applying neural networks in coordinated group signal transformation to improve image quality. Computer Optics 2024; 48(6): 924-931.

### **Публикации, индексируемые в международной базе Scopus**

5. Ivanov V. V. et al. Efficiency Evaluation of Group Signals Transformation for Wireless Communication in V2X Systems //2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – IEEE, 2022. – С. 167-170.

6. Ivanov V. V. et al. Coordinated Group Codec for Systems with Highly Correlated Signals on the ESP32 Microcontroller //2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – IEEE, 2023. – С. 174-177.

7. Ivanov V. V. et al. Evaluation of Group Signal Transformation Efficiency for Earth Remote Sensing Systems //2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – IEEE, 2023. – С. 1-5.

### **В других изданиях**

8. Иванов В.В., Кузнецов И.В. Использование нелинейного ограничителя сигналов в координированном ДИКМ-преобразователе. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 2023. Р. 164–165.

9. Иванов В.В., Лопухова Е.А., Кузнецов И.В. Применение метода коэффициентов ошибок в линейных координированных ДИКМ преобразователях. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 2023. Р. 166–168.

10. Макет координированного группового кодека для сенсорных систем с использованием микроконтроллера ESP32 / И. О. Абдеев, В. В. Иванов, Е. А. Лопухова, И. В. Кузнецов // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: Материалы XXIV Международной научно-технической конференции и материалы XX Международной научно-

технической конференции. В 2-х томах, Уфа, 23–25 ноября 2022 года. Том I. – Уфа: Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Уфимский Университет Науки И Технологий», 2023. – С. 241-242.

11. Оценка BER для систем группового преобразования сигналов / В. В. Иванов, И. О. Абдреев, Е. А. Лопухова [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2023) : сборник трудов по материалам IX Международной конференции и молодежной школы : в 6 т., Самара, 17–23 апреля 2023 года. Том 2. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 23212.

12. Иванов, В. В. Макет энергоэффективной сенсорной системы с использованием группового преобразования сигналов для сети Интернета вещей в горнодобывающей промышленности / В. В. Иванов // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 21–27 мая 2023 года / Санкт-Петербургский горный университет. Том 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 30-33.

13. Иванов, В. В. Сжатие изображений методом группового преобразования сигналов / В. В. Иванов // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2023) : Сборник тезисов докладов X Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, 20 апреля 2023 года / Редколлегия: В.И. Воловач (пред.) [и др.]. – Тольятти: Поволжский государственный университет сервиса, 2023. – С. 62-68.

### **Регистрация интеллектуальной деятельности**

1. Патент на полезную модель № 228603 U1 Российская Федерация, МПК G10L 19/04. Устройство для координированной групповой обработки сигналов в многоканальных системах дифференциальной импульсно-кодовой модуляции : № 2024111790 : заявл. 27.04.2024 : опубл. 05.09.2024 / В. В. Иванов, Г. С. Воронков, Е. А. Лопухова, И. В. Кузнецов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

2. Патент на полезную модель № 228230 U1 Российская Федерация, МПК G10L 19/04, G06N 3/02. Устройство для дифференциальной импульсно-кодовой модуляции с использованием нейронной сети : № 2024111781 : заявл. 27.04.2024 : опубл. 20.08.2024 / В. В. Иванов, Г. С. Воронков, Е. А. Лопухова, И. В. Кузнецов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660220 Российская Федерация. Программа для сжатия изображений методом группового преобразования сигналов : № 2023619543 : заявл. 11.05.2023 : опубл. 18.05.2023 / В. В. Иванов.

Диссертант



В.В. Иванов