РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ



XI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ, ПОСВЯЩЕННАЯ ДНЮ РАДИО И СВЯЗИ

Сборник трудов
(Тамбов, 7 мая 2026 г.)

Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

XI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ, ПОСВЯЩЕННАЯ ДНЮ РАДИО И СВЯЗИ

Сборник трудов
(Тамбов, 7 мая 2026 г.)

Научное электронное издание

Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026

УДК 621.396.6
ББК *з*844-02
Р15

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я :

Д. Ю. Муромцев – ответственный редактор,
О. А. Белоусов – зам. ответственного редактора,
С. П. Москвитин, А. П. Пудовкин, С. В. Фролов, Н. Г. Чернышов

Р15 **Радиоэлектроника.** Проблемы и перспективы развития [Электронный ресурс] : сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной Дню радио и связи / под ред. Д. Ю. Муромцева и др. ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Mb ; необходимое место на HDD 10,0 Mb ; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-1556-3 (общ.)
ISBN 978-5-8265-3047-4 (XI)

Представлены тезисы докладов и статьи участников XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития», посвященной «Дню радио и связи», в которых раскрываются вопросы проектирования радиоэлектронных систем различного назначения на всех стадиях производства, генерации сигналов, приема и передачи различной информации по каналам связи, развития и применения радиоэлектроники в медицине и биомедицинской технике.

Предназначен для студентов, молодых исследователей, а также инженерно-технических работников различных отраслей промышленности.

УДК 621.396.6
ББК *з*844-02

Материалы предоставлены в электронном виде,
организаторы конференции и редакция ответственности
за содержание предоставленных авторами материалов не несут.

Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.

ISBN 978-5-8265-1556-3 (общ.)
ISBN 978-5-8265-3047-4 (XI)

©Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2026

Секция 1
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО ТОЧКАМ ДОСТУПА Wi-Fi

А. В. Архипова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Asay1710@yandex.ru)

Для решения задачи определения координат местоположения объектов широкое распространение получил позиционный метод, использующий радиотехнические, лазерные и другие системы. Позиционный метод основан на определении координат местоположения объекта путем засечек, представляющих собой точку пересечения не менее двух линий (поверхностей) положения относительно ориентиров с известными координатами местоположения. В позиционном методе различают дальномерный, угломерный и разностно-дальномерный способы измерения навигационного параметра. При использовании радионавигационных систем (РНС) под навигационным параметром при дальномерном способе для пассивных РНС принимают дальность до излучающего маяка, а для активных РНС – удвоенную дальность. Примером РНС, использующих дальномерный способ для определения координат местоположения, являются спутниковые радионавигационные системы BDS (Beidou Sattellite Navigation System, Китай), GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Европа), QZSS (Япония) [1 – 4]. Применение данных систем позволяет получать высокую точность определения координат местоположения объектов, так, например, при использовании сервиса дифференциальной коррекции TerraStar точность определения составляет сантиметры.

Однако применение данных систем внутри подвальных помещений, железобетонных зданий может приводить к кратковременной потере сигнала из-за малого отношения сигнал–шум и, как следствие, к невозможности определения координат местоположения. Поэтому предлагается в таких помещениях для определения координат местоположения использовать радиомаяки в виде точек доступа Wi-Fi, которые должны быть размещены в точках с точно известными координатами. Количество точек доступа Wi-Fi должно быть не менее трех, что гарантирует определение местоположения объекта в трехмерном пространстве в заданной системе координат. На борту объекта должно быть установлено устройство, работающее с точками доступа Wi-Fi. Устройство должно работать в активном всенаправленном режиме Null Probe Request. После излучения посылок Probe Request и запуска Probe Timer по ответам Probe Response от точек доступа измеряется время задержки между излученным и принятым сигналом до конкретной точки доступа. По времени задержки определяется дальность до точки доступа Wi-Fi по формуле

$$Д = \frac{(\tau - \tau_З)}{2}, \quad (1)$$

где Д – измеренная дальность до объекта в метрах; τ – время прохождения сигнала до точки доступа и обратно в секундах; $\tau_з$ – время задержки принятого сигнала в точке доступа, необходимое на его обработку и формирование ответного сигнала, в секундах; c – постоянная, соответствующая скорости света ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Измеряя дальности до трех точек Wi-Fi, можно определить координаты объекта в пространстве, решая систему уравнений

$$\begin{cases} Д_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}; \\ Д_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}; \\ Д_3 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}; \end{cases} \quad (2)$$

где $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ – измеряемые на объекте дальности до трех точек доступа Wi-Fi; (x, y, z) – координаты объекта; (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3) – координаты трех точек доступа Wi-Fi.

Количество точек доступа зависит от чипа и драйвера, но стабильная работа обычно гарантируется для 8 – 16 точек.

Библиографический список

1. Определение аномальных измерений псевдодальности до навигационного космического аппарата в аппаратуре приема сигналов спутниковой радионавигационной системы / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, А. А Иванов, Н. А. Лежнева // Радиотехника и электроника – 2024. – № 8(69). – С. 727 – 740.

2. Adaptive Algorithms for Information Processing in Navigation Complexes of Mobile Ground Objects / A. V. Ivanov, V. Yu. Shishkin, D. V. Boikov, et al. // Journal of Communications Technology and Electronics – 2021. – № 8(66). – P. 926 – 937.

3. Адаптивные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах подвижных наземных объектов / А. В. Иванов, В. Ю. Шишкин, Д. В. Бойков и др. // Радиотехника и электроника. – 2021. – № 8(66). – С. 1 – 12.

4. Определение аномальных измерений радиосигналов спутниковой радионавигационной системой методом статистической обработки невязок измерений / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, Н. А. Лежнева, А. А. Иванов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 27 – 40.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

АДАПТИВНЫЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЕЙ ZigBee

Р. А. Бегляминов, С. П. Москвитин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: beglyaminov.1.1.1@mail.ru)

Для сбора данных в беспроводных самоорганизующихся сетях с множеством абонентов критичны низкое энергопотребление и способность сети к самовосстановлению. Технология Wi-Fi энергозатратна для автономных устройств. Bluetooth Low Energy (BLE) mesh имеет проблемы совместимости стеков разных производителей. Thread, как и ZigBee, работающий на стандарте IEEE 802.15.4, менее распространен и сложнее сертифицируется. ZigBee, в свою очередь, имеет сверхнизкое энергопотребление, поддержку до 65 000 узлов, а сертификация ZigBee Alliance гарантирует совместимость [1].

В ячеистой (mesh) сети ZigBee маршрут ищется реактивным алгоритмом AODVjr (Ad-hoc On-demand Distance Vector Junior). Он широковещательно рассылает запрос RREQ (Route Request) и выбирает кратчайший путь, однако каждый узел, получив RREQ, ретранслирует его, порождая широковещательный шторм и бесполезный расход энергии узлов, не участвующих в итоговом маршруте [2]. Для решения данной проблемы был разработан модифицированный алгоритм AODVae (adaptive energy).

Предлагаемый алгоритм AODVae добавляет к процессу рассылки энергетическую проверку. Получив запрос RREQ, узел сравнивает текущий уровень заряда батареи с персональным порогом, который вычисляется устройством локально и зависит от количества соседних узлов. Если соседей мало, потеря узла не критична – устанавливается низкий порог, ретрансляция разрешена при слабом заряде батареи. Если же у узла много соседей, его преждевременный разряд может разорвать сеть, поэтому порог для него будет высоким: ретрансляция разрешена при высоком заряде батареи. Все данные, нужные для принятия решения, узел получает локально. Число соседей он вычисляет по размеру таблицы соседей, которую ZigBee-стек ведет в памяти. Текущий заряд батареи измеряется аппаратно. Глобальные параметры для расчетов могут быть прошиты в устройство заранее или разово переданы координатором при подключении к сети. Таким образом, дополнительного служебного трафика не возникает – каждый узел принимает решение самостоятельно.

Принцип работы алгоритма задается функцией определения порога:

$$E(a) = E_{\min} + (E_{\max} - E_{\min})\left(\frac{d}{D_{\max}}\right)^a, \qquad (1)$$

где $E(a)$ – величина персонального порога; $E_{\min}$ и $E_{\max}$ – величины минимального и максимального порога; d – топологическая важность узла; $D_{\max} \geq d \geq 2$. Dmax – нормировочный коэффициент, равный максимальному возможному числу соседей (обычно 5…10% от количества устройств сети); a – параметр регулировки чувствительности порога, $a \geq 0$.

Для количественной оценки введем модель, состоящую из N узлов, разделенных на две категории: узлы со средней степенью связности *dlow* и общей долей (1 – p) узлов и узлы со средней степенью связности *dhigh* и общей долей p узлов. Текущий заряд батареи считаем случайной независимой величиной, распределенной в [0; 1]. Согласно (1) подставляем значения *dlow* и *dhigh* вместо d, получаем пороговые значения для каждой из двух категорий $Elow(a)$ и $Ehigh(a)$.

Таким образом, вероятности активности узла:

$$Plow(a) = 1 - Flow(a);\ \ Phigh(a) = 1 - Ehigh(a). \tag{2}$$

Среднее ожидаемое число узлов, участвующих в широковещательной рассылке:

$$Nact(a) = N((1-p)\,Plow(a) + p\,Phigh(a)). \tag{3}$$

В таком случае, экономия служебного трафика:

$$Econ(a) = \left(1 - \frac{Nact(a)}{N}\right)100\%. \tag{4}$$

Ключевой настройкой алгоритма становится параметр a, для определения которого необходимо решить неравенство $Phigh(a) \geq Pt$, где Pt – порог требуемого уровня надежности, задаваемого разработчиком для конкретной реализации сети. Максимальная экономия достигается на границе, т.е. если $Phigh(a) = Pt$. Используя данное равенство, а также равенства (2), получим аналитическую формулу вычисления оптимального параметра a:

$$a = \frac{\ln\left(\dfrac{1 - E_{\min} - Pt}{E_{\max} - E_{\min}}\right)}{\ln\left(\dfrac{dhigh}{D_{\max}}\right)}. \tag{5}$$

Таким образом предложен модифицированный алгоритм маршрутизации AODVae для ячеистых сетей ZigBee, отличающийся введением адаптивного энергетического порога, зависящего от топологической важности узла. Разработана аналитическая модель, позволяющая оценить ожидаемую экономию служебного трафика при ограничении на связность сети. Получено аналитическое выражение параметра чувствительности a, что дает возможность еще на этапе проектирования выбирать настройки алгоритма, обеспечивающие требуемый уровень надежности с максимальной энергоэффективностью. Предложенный подход не требует изменения форматов служебных сообщений ZigBee и может быть реализован программно на существующих устройствах.

Библиографический список

1. Zigbee [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. – URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Zigbee (дата обращения: 01.05.2026).

2. Бирюков, А. Архитектура сетей Zigbee [Электронный ресурс] / А. Бирюков // Хабр: сайт. – URL : https://habr.com/ru/companies/otus/articles/919250/ (дата обращения: 02.05.2026).

3. Улучшение топологии алгоритма ячеистой маршрутизации ZigBee AODV и анализ результатов моделирования [Электронный ресурс] // ResearchGate. – URL : https://www.researchgate.net/figure/Average-MAC-Control-Traffic-Received_fig2_307740026 (дата обращения: 03.05.2026).

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Е. А. Белан, В. В. Воробьёв

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

Одним из наиболее перспективных направлений развития современных энергосберегающих технологий является создание компактных модульных систем, способных реализовывать интеллектуальное и оптимальное управление энергопотреблением. При проектировании подобных систем ключевыми задачами становятся комплексная идентификация объекта в различных режимах функционирования, разработка математических моделей и программного обеспечения, а также построение эффективной структуры управления.

Анализ современного технологического оборудования показывает, что во многих производственных процессах управляющее воздействие необходимо формировать не для отдельного приемника энергии, а для совокупности взаимосвязанных и неоднородных потребителей. При этом каждый приемник энергии обладает собственными характеристиками и режимами работы, вследствие чего оптимальное управление для одного элемента системы может существенно отличаться от управления для другого. Дополнительную сложность представляет необходимость учета взаимного влияния отдельных приемников энергии друг на друга.

Такую совокупность приемников энергии можно рассматривать как сложную многоуровневую систему, состоящую из ряда подсистем с определенной степенью автономности, объединенных внутренними связями в единый объект управления. Каждая подсистема характеризуется собственными локальными параметрами, регулирование которых должно осуществляться автономно в соответствии с локальными целями. Одновременно с этим для достижения общей глобальной цели системы – минимизации энергозатрат при сохранении требуемых технологических параметров – необходимо реализовывать координированное глобальное управление.

В качестве примера подобной системы можно рассмотреть многозонные печи, предназначенные для термической обработки различных материалов. Конструкция такой печи включает несколько зон нагрева, транспортный механизм и блоки электронагревательных элементов. Особенностью эксплуатации данных печей является значительное время выхода на рабочий режим, которое может достигать 24 часов, а также ступенчатое распределение температуры по отдельным зонам нагрева.

В качестве примера можно рассмотреть многозонные печи для отжига разнообразных материалов. Схематическое изображение печи показано на рис. 1.

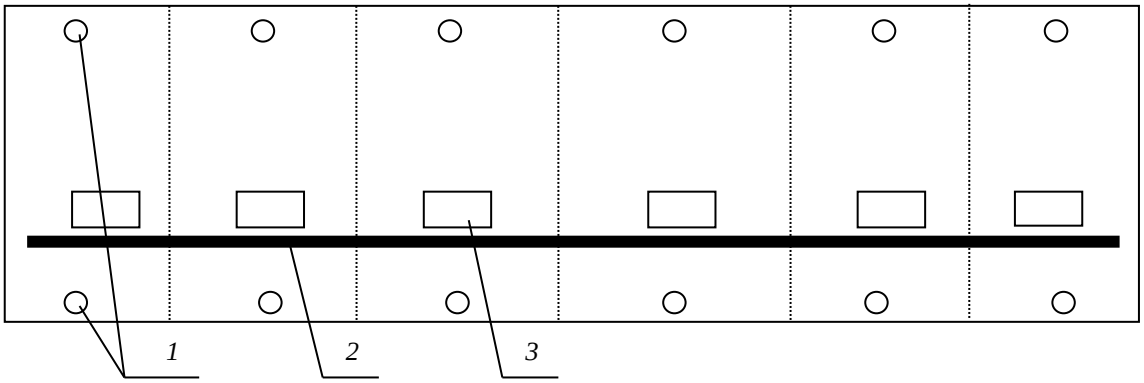


Рис. 1. Схема многосекционной печи:
1 – блок электронагревательных элементов; *2* – транспортер; *3* – заготовки

Особенностями работы данной печи являются длительное время разогрева порядка 24 часов и ступенчатое изменение температуры в зонах.

Одним из наиболее критичных нештатных режимов работы является отказ одного или нескольких теплоэлектронагревателей (ТЭНов). Подобная ситуация, как правило, приводит к нарушению температурного режима, недогреву продукции и, как следствие, к появлению брака. Дополнительные потери связаны с вынужденной остановкой технологического процесса, повторным запуском оборудования и дополнительными затратами энергии на повторный нагрев печи.

В связи с этим система управления должна решать одновременно две взаимосвязанные задачи: обеспечивать оптимальный энергосберегающий режим разогрева печи и минимизировать вероятность выпуска бракованной продукции. Решение второй задачи возможно несколькими способами либо их комбинацией. Например, при отказе нагревателя в зоне, где оборудование функционирует с запасом мощности, возможно перераспределение нагрузки путем повышения мощности соседних ТЭНов, что позволяет компенсировать нарушение температурного баланса. Другим вариантом является снижение скорости движения транспортера одновременно с корректировкой мощности нагревателей в остальных зонах, что позволяет сохранить необходимое качество термообработки изделий.

В общем виде многозонную печь как объект управления можно представить в следующем виде:

$$\langle M, F, S, O \rangle, \quad (1)$$

где M – математическая модель объекта управления; F – минимизируемый функционал энергозатрат; S – стратегия управления; O – система ограничений.

При этом на этапе разогрева целесообразно использовать программную стратегию управления, а в установившемся режиме – позиционную. В простейшем случае модель объекта включает модель нагревательного элемента и модель электропривода транспортной системы.

Таким образом, применение интеллектуальных методов энергосберегающего управления для сложных систем с неоднородными приемниками энергии позволяет не только снизить энергетические затраты, но и повысить надежность технологических процессов, уменьшить вероятность аварийных режимов и обеспечить стабильное качество выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. Кольтюков, Н. А. Оптимальное энергосберегающее управление смесительными машинами предприятий по производству и переработке полимерных материалов : дис. … канд. техн. наук / Н. А. Кольтюков ; ТГТУ. – Тамбов, 2002. – 174 с.

2. Белоусов, О. А. Энергосберегающее управление группой мощных аппаратов с электронагревом / О. А. Белоусов, Н. А. Кольтюков, Ю. Т. Зырянов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 5(65). – С. 27 – 29.

3. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 55 – 59.

4. Данилов, С. Н. Алгоритм сопровождения с реконфигурацией модели / С. Н. Данилов, Н. А. Кольтюков, Р. А. Ефремов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 418 – 423.

5. Данилов, С. Н. Мультимодельный алгоритм сопровождения со сниженными вычислительными затратами / С. Н. Данилов, Н. А. Кольтюков, Р. А. Ефремов // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : тез. докл. 2 Междунар. конф. с элементами научной школы. – Тамбов, 22 – 24 апреля 2015 года. – С. 304–305.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Е. А. Белан, В. В. Воробьёв, Н. А. Кольтюков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

В настоящее время развитие гибридных транспортных систем является одним из наиболее перспективных направлений в области энергосберегающих технологий. Использование комбинированных силовых установок позволяет снизить потребление топлива, повысить эффективность работы транспортных средств и уменьшить уровень вредных выбросов.

При проектировании гибридного транспорта возникает необходимость выбора оптимальных параметров электропривода типа электрического двигателя и алгоритмов управления. Отсутствие универсальных методик расчета существенно усложняет процесс разработки подобных систем.

Анализ существующих исследований показывает, что для реализации энергосберегающего управления необходимо создать математическую модель электропривода, пригодную для описания различных режимов функционирования системы. Такая модель должна обеспечивать возможность быстрого вычисления параметров управления и учитывать динамические характеристики двигателя.

Для большинства практических задач может использоваться линеаризованное уравнение динамической механической характеристики асинхронного двигателя:

$$M = M_k \left(2\frac{s}{s_k} \right) \Big/ \left(1+\frac{s}{s_k} \right)^2, \qquad (1)$$

где S_k – критическое скольжение; M_k – критический момент двигателя.

Для оперативного синтеза систем управления удобно использовать передаточные функции электропривода. При управлении напряжением статора модель может быть представлена следующим выражением:

$$W(p) = \frac{K}{(Tp+1)}, \qquad (2)$$

где K – коэффициент передачи двигателя; T – постоянная времени; p – оператор Лапласа.

Также при анализе электромеханических процессов учитываются сопротивления обмоток ротора и параметры статора:

$$T = \frac{L}{r^2}, \qquad (3)$$

где L – индуктивность цепи; r^2 – сопротивление обмоток ротора.

Таким образом, разработанная модель динамики асинхронного электродвигателя может быть использована при синтезе систем оптимального энерго-

сберегающего управления гибридным транспортом. Применение подобных моделей позволяет повысить эффективность работы электропривода и сократить энергетические затраты.

Библиографический список

1. Кольтюков, Н. А. Оптимальное энергосберегающее управление смесительными машинами предприятий по производству и переработке полимерных материалов / Н. А. Кольтюков. – Тамбов, 2002.

2. Белоусов, О. А. Энергосберегающее управление группой мощных аппаратов с электронагревом / О. А. Белоусов, Н. А. Кольтюков, Ю. Т. Зырянов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015.

3. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ПРИМЕНЕНИЕ АНТЕННЫ ТИПА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» В СЕТЯХ LoRa

Р. А. Бобылёв

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: ssazlc@yandex.ru)

Тенденции последних лет развития сетей «Интернета вещей» (IoT) при использовании нелицензируемых диапазонов частот (433, 868, 915 МГц) показывает широкое применение автономных датчиков, систем «Умный город» и промышленного мониторинга. Технология LoRa (Long Range) обеспечивает связь на расстояния до 15 км при сверхнизком энергопотреблении, однако эффективность канала существенно зависит от параметров антенно-фидерного тракта. Среди разнообразия антенных систем направленная антенна «волновой канал» (Яги-Уда) занимает особое место благодаря высокому коэффициенту усиления при пассивной конструкции [1].

Антенна «волновой канал» – линейная направленная антенна, состоящая из активного полуволнового вибратора, одного рефлектора и нескольких директоров. Каждый из пассивных элементов осуществляет переизлучение электромагнитной волны с определенным фазовым сдвигом, когерентным по отношению к активному вибратору [1, 4]. Диаграмма направленности формируется в результате интерференции волн, излучаемых всеми элементами. Рефлектор, имеющий длину больше активного вибратора, создает поле в противофазе, ослабляя излучение в заднем секторе. Директоры, длина

которых меньше длины вибратора, обеспечивают опережение фазы и сужают главный лепесток в направлении оси антенны. Множитель решетки для волнового канала описывается интерференционной суммой полей всех элементов, что позволяет получить коэффициент направленного действия до 11…15 дБ при 8 – 12 элементах [1, 2].

Рассмотрим основные конструктивные особенности антенны.

1. Трехэлементная антенна (вибратор, рефлектор, один директор) имеет ширину главного лепестка по половинной мощности около 70…80° при усилении 5…6 дБ. Такая антенна оптимальна для шлюзов, расположенных на краю города или в сельской местности, где требуется перекрыть сектор в 60…90° без жесткой привязки к азимуту. Однако следует учитывать, что боковые лепестки, даже при хорошем подавлении (–12…–15 дБ относительно главного), могут принимать отраженные сигналы и помехи от соседних источников.

2. Многоэлементная антенна (6 – 12 директоров) сужает луч до 30…40° и увеличивает усиление до 10…14 дБ. Это позволяет при фиксированном положении шлюза и оконечного устройства получить максимальную энергоэффективность канала. При этом все элементы остаются пассивными, что полностью сохраняет энергетический бюджет устройства.

Особенности работы антенны «волновой канал» в условиях реального применения требуют учета прежде всего взаимного влияния вибраторов с окружающими металлическими конструкциями. Антенные переизлучатели имеют раскрывы, совпадающие с осью антенны (угол $\alpha = 0°$ относительно направления на корреспондента), что минимизирует прием сигналов с боковых и тыловых направлений. Применение волнового канала с узким лучом уменьшает количество принимаемых лучей, снижая межсимвольную интерференцию и повышая отношение сигнал/шум на 6…10 дБ по сравнению с ненаправленными аналогами.

С точки зрения помехоустойчивости антенна «волновой канал» с равномерным амплитудным распределением (все директоры имеют одинаковую настройку) имеет типичный уровень боковых лепестков порядка –12…–15 дБ, что не является оптимальным в условиях плотной частотной загрузки. В реальной ситуации в диапазоне LoRa, как правило, присутствуют широкополосные помехи от цифровых устройств, индустриальные импульсные шумы и внутриполосные помехи от соседних шлюзов. Эти помехи могут существенно снизить чувствительность приемника даже при наличии направленной антенны. Поэтому антенна «волновой канал» в системах LoRa должна быть адаптирована к окружающей среде путем оптимизации длин директоров и расстояний между ними, что позволяет «развалить» боковые лепестки или сдвинуть их в менее опасные азимутальные сектора. Современные методы компьютерного моделирования (например, в 4NEC2 или MMANA-GAL) позволяют для каждого конкретного места установки шлюза рассчитать геометрию волнового канала с минимальным уровнем боковых полей именно в направлениях на источники локальных помех, будь то работающий рядом промышленный контроллер или транспортная магистраль.

Таким образом, антенна типа «волновой канал» является наиболее эффективным пассивным средством увеличения дальности и помехоустойчивости в сетях LoRa при условии корректного учета местной электромагнитной обстановки и тщательной настройки геометрии директоров. Простота конструкции, отсутствие активных фазовращателей и возможность расчета под конкретную частоту (433, 868 или 915 МГц) делают ее предпочтительным выбором для стационарных LoRa-шлюзов, работающих в коридорах, вдоль трасс или на открытых пространствах.

Библиографический список

1. Пудовкин, А. П. Основы теории антенн : учебное пособие / А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк, А. А. Иванков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2011. – 92 с.
2. Панасюк, Ю. Н. Устройства сверхвысоких частот : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2015. – 80 с.
3. Панасюк, Ю. Н. Основы автоматизации проектирования устройств СВЧ и антенн [Электронный ресурс, мультимедиа] : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 270 с.
4. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.

СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИРОВЩИКИ АНТЕНН: ОБЗОР ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ И ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ

Р. А. Бобылёв

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: ssazlc@yandex.ru)

В настоящее время рост требований к антенным системам (5G, IoT, MIMO) делает компьютерное моделирование обязательным этапом проектирования. Современные моделировщики позволяют рассчитывать диаграммы направленности, КСВ, коэффициенты взаимного влияния с учетом сложных материалов и геометрии [1 – 3]. Это дает возможность оптимизировать антенну до изготовления, варьировать подложки, форму излучателей и их расположение в решетке. Благодаря гибридным методам сегодня можно моделировать электрически большие структуры с высокой точностью [3, 4].

Немалой проблемой является выбор подходящего численного метода, заложенного в ядро. На данный момент используются три метода:

1. Метод моментов (MoM). Исследуемая антенна разбивается на мелкие фрагменты – сетку (триангуляция). Уравнения поля преобразуются в систему

линейных алгебраических уравнений. Метод MoM эффективен для проволочных антенн, так как сетка создается только на поверхности объекта, а не во всем объеме. Классические ядра (NEC, MININEC) живы в любительских пакетах, но плохо работают с диэлектриками и объемными токами [3].

2. Метод конечных разностей во временной области (FDTD). Электрическое и магнитное поля смещены относительно друг друга в пространстве и времени на «полшага», что позволяет вычислять производные максимально точно. Метод FDTD универсален, позволяет моделировать широкополосные характеристики антенн за один расчет. Недостаток – высокая требовательность к памяти и ступенчатая аппроксимация криволинейных границ.

3. Метод конечных элементов (FEM). Численный метод решения дифференциальных уравнений, используемый для моделирования физических процессов антенн (разбивается антенна на миллионы маленьких и простых элементарных излучателей). Метод FEM лучший для сложных геометрий и неоднородных материалов. Основной недостаток FEM – трудности с открытыми границами и большие вычислительные затраты на низких частотах.

Сегодня популярны следующие моделировщики. Это бесплатные openEMS (FDTD) и MMANA-GAL Pro (MoM с расширениями). Из коммерческих лидируют CST Studio Suite (гибридное ядро FIT/FEM) и ANSYS HFSS (FEM). Рассмотрим моделирование диаграммы направленности в openEMS для волновой антенны на частоте 2,4 ГГц.

Моделирование диаграммы направленности волновой антенны в openEMS на 2,4 ГГц включает: создание геометрии, задание материалов, установку источника возбуждения (2,4 ГГц), настройку граничных условий (PML), расчет ЭМП в ближней зоне и дальней зоне для формирования диаграммы направленности.

После вычисления временных откликов получаем амплитудную диаграмму направленности в дальней зоне – вид в главных плоскостях представлен на рис. 1.

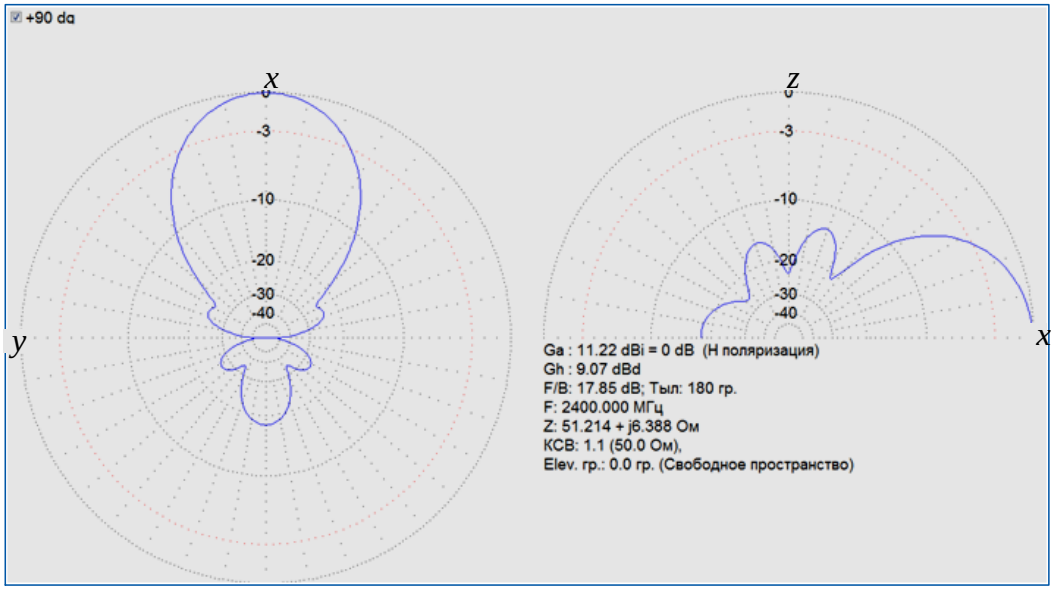


Рис. 1. Диаграмма направленности антенна–волновой канал

Таким образом, компьютерное моделирование с помощью специализированных программ позволяет исследовать антенну и, изменяя ее параметры, оптимизировать под конкретные условия и требования.

Библиографический список

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.

2. Пудовкин, А. П. Основы теории антенн : учебное пособие / А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк, А. А. Иванков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2011. – 92 с.

3. Панасюк, Ю. Н. Устройства сверхвысоких частот : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2015. – 80 с.

4. Панасюк, Ю. Н. Основы автоматизации проектирования устройств СВЧ и антенн [Электронный ресурс, мультимедиа] : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 270 с.

МАТРИЧНЫЙ СИНТЕЗ КОМПАКТНОЙ LC-МОДЕЛИ Т-ОБРАЗНОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО ШЛЕЙФА

В. С. Вагнер[1], С. А. Слинчук[1], Н. Н. Щетинин[2]

[1]Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
(e-mail: rt.kaf@cchgeu.ru)
[2]Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Россия
(e-mail: nikita.shetinin@mail.ru)

В современных радиочастотных трактах часто возникает необходимость (особенно на УВЧ) заменить громоздкие четвертьволновые отрезки линий передачи более компактными структурами. Эффективным решением являются Т-образные микрополосковые шлейфы, электрические свойства которых можно точно воспроизвести с помощью схем на сосредоточенных LC-элементах [1 – 3]. В данной работе представлен аналитический подход к синтезу трехзвенной эквивалентной схемы, базирующийся на матричном формализме ABCD.

Предлагаемая модель состоит из трех каскадно соединенных Т-образных ячеек: две из них эмулируют высокоомные участки микрополосковой линии, третья отвечает за низкоомный участок [4, 5]. Номиналы индуктивностей и емкостей вычисляются через волновые сопротивления и электрические длины соответствующих отрезков. Ключевым условием синтеза является равенство результирующей ABCD-матрицы каскадного соединения матрице идеального $\lambda/4$-трансформатора, что гарантирует воспроизведение фазового набега 90° и заданного характеристического сопротивления [6].



Рис. 1. Микрополосковый Т-образный шлейф

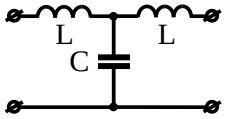


Рис. 2. Элементарная Т-ячейка

Процедура синтеза начинается с выбора параметров высокоомного звена, ограниченных технологическими возможностями микрополосковой реализации (ширина проводника, толщина подложки, допустимые габариты). Затем, используя уравнение матричной эквивалентности, определяются показатели низкоомного Т-образного участка, после чего аналитически находятся все значения индуктивностей *L* и емкостей *C* модели шлейфа.

Разработанная методика апробирована на примере синтеза схемы, заменяющей Т-образный шлейф с волновым сопротивлением 35,35 Ом при центральной частоте 0,9 ГГц. Моделирование *S*-параметров в пакете САПР подтвердило высокую точность подхода (рис. 3): на рабочей частоте 0,9 ГГц коэффициент отражения S_{11} составил «минус» 58 дБ, фазовая погрешность не превысила 0,4°, а отклонение волнового сопротивления от номинала оказалось менее 0,2%.

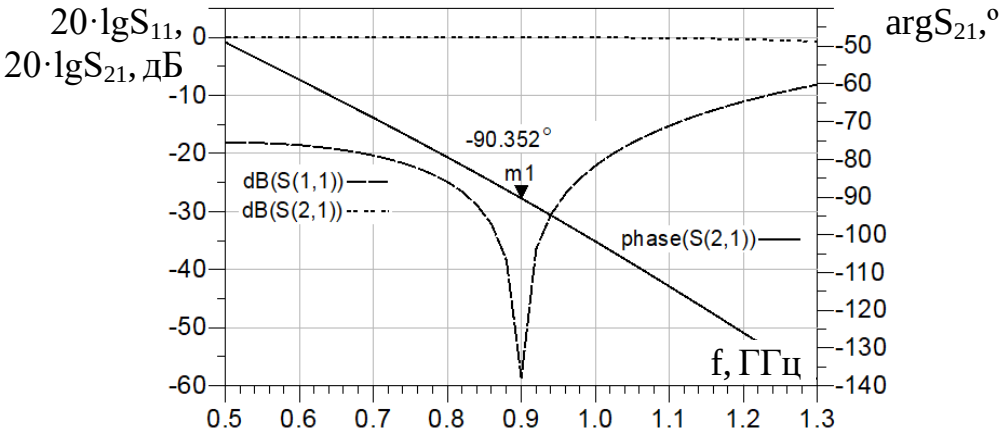


Рис. 3. АЧХ- и ФЧХ-схемы, замещающей микрополосковый Т-шлейф

Разработанный алгоритм позволяет оперативно и точно определять параметры сосредоточенных элементов моделей компактных микрополосковых структур. Метод расширяет инструментарий проектирования миниатюрных СВЧ-устройств, где критичны одновременно малые габариты и строгое соответствие заданным электродинамическим характеристикам [7].

Библиографический список

1. Летавин, Д. А. Миниатюризация делителей мощности УВЧ диапазона / Д. А. Летавин. – М. : Изд. дом Академии Естествознания, 2022. – 138 с.

2. Останков, А. В. Частотные характеристики модифицированных микрополосковых шлейфов, эквивалентных четвертьволновым отрезкам / А. В. Останков, Н. Н. Щетинин, С. Ю. Дашян // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 51 – 56.

3. Обеспечение рабочих характеристик модифицированных микрополосковых шлейфов в полосе частот / Н. Н. Щетинин, А. В. Останков, Е. В. Черноярова, Ю. Е. Калинин // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 8. – С. 28 – 35.

4. Останков, А. В. Трехсекционная схема замещения микрополоскового Т-образного шлейфа / А. В. Останков, Н. Н. Щетинин // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXXI Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2025. – Т. 4. – С. 198 – 203.

5. Останков, А. В. Синтез трехзвенной схемы замещения микроволнового шлейфа / А. В. Останков, Н. Н. Щетинин // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXXII Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж : Издательский дом ВГУ. – 2026. – Т. 5. – С. 104 – 110.

6. Модификации направленных ответвителей с малоразмерными шлейфами нестандартной конфигурации / А. В. Останков, В. Н. Кострова, Н. Н. Щетинин, К. А. Разинкин // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 6(12). – С. 49 – 57.

7. Broadband beam-forming circuit using microstrip multilayer couplers / A. V. Ostankov, N. N. Shchetinin, O. V. Chernoyarov, S. Pergamenchtchikov // International Journal on Communications Antenna and Propagation. – 2020. – V. 10, No. 5. – P. 295 – 301.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ГИБРИДНОЙ СЕТИ LoRa-BLE С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ШЛЮЗА

М. Ф. Гасанов, В. В. Тарасов, М. В. Тарасов, П. В. Семенов

Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина,
Тамбов, Россия
(e-mail: gasanov@tsutmb.ru)

Для развития «Интернета вещей» нужны гибкие способы передачи данных на разные расстояния. LoRa обеспечивает значительный радиус покрытия, в то время как BLE эффективен для локального взаимодействия. Центральным узлом системы выступает шлюз на базе микроконтроллера ESP32-H2. К шлюзу по интерфейсу BLE5 подключались оконечные устройства с чипом NRF52840, оснащенные LoRa-трансиверами (SX1262). Модуль был настроен на следующие параметры модуляции: SF7, BW125, CR4/7, мощность 14 дБм.

Для оценки качества канала проводились испытания на местности в условиях плотной городской застройки. Устройство-передатчик перемещалось по заданному маршруту, в то время как шлюз оставался стационарным. Сбор статистики включал: RSSI, SNR, геометки.

Экспериментальные данные показывают затухание сигнала при удалении от шлюза. В условиях города RSSI быстро затухает [1], также наблюдаются резкие флуктуации, вызванные многолучевым распространением с чередованием интервалов прямой видимости, где принимаемая мощность сигнала сильно

возрастает (рис. 1). Показатель SNR продемонстрировал высокую чувствительность к преградам. При отрицательных значениях SNR (–11 дБ) технология LoRa продолжала успешно декодировать пакеты благодаря механизму расширения спектра (рис. 2). На основе собранных геоданных была построена тепловая карта покрытия (рис. 3). Анализ выявил зоны «радиотени» несмотря на относительно небольшую дистанцию до шлюза и относительно большую мощность принимаемого сигнала (выше порога чувствительности). Это обусловлено наличием интенсивных внеполосных или внутриканальных помех в выявленных зонах.

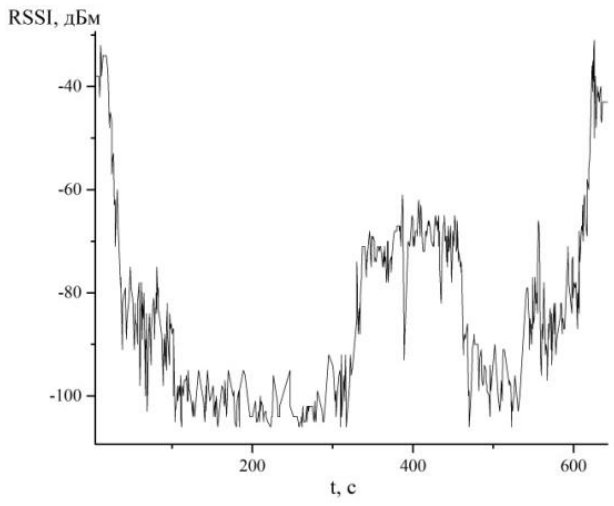


Рис. 1. Динамика изменения мощности сигнала RSSI

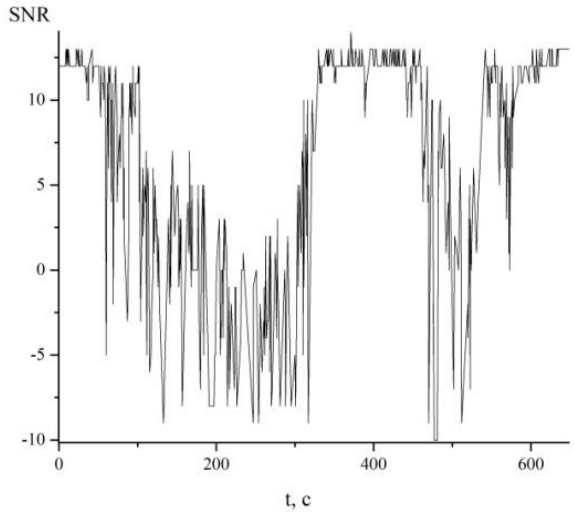


Рис. 2. Динамика изменения мощности сигнала SNR

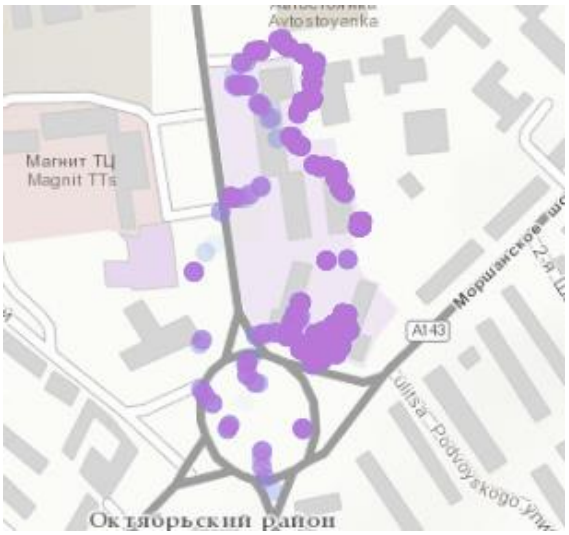


Рис. 3. Тепловая карта SNR

Система, построенная на базе ESP32-H2 и nRF52840/SX1262, подтвердила эффективность в условиях плотной городской застройки. При этом LoRa демонстрирует устойчивость при отрицательном значение SNR. Анализ экспериментальных данных показал, что использование геоданных и метрик качества сигнала позволяет эффективно картировать зоны покрытия.

Библиографический список

1. Дерюгин, Ф. Ф. Анализ и сравнение моделей распространения радиосигнала для LoRa в контексте промышленного «Интернета вещей»: ограничения, перспективы и применение / Ф. Ф. Дерюгин, Р. В. Кононенко, Д. Н. Сидоров. – 2025.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Н. А. Гущин, Е. А. Белан, И. С. Федосеенко, Н. А. Кольтюков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

Одной из важнейших проблем человечества является экономия энергоресурсов. В связи с ростом цен на электроэнергию и топливо, усилением конкурентной борьбы между фирмами, производящими тепловые аппараты, машины с электроприводами, транспортные средства и другие энергопотребляемые изделия, а также учитывая сложность социально-экономической обстановки, актуальность задач экономии и рационального использования энергоресурсов с каждым годом возрастает. Проблема экономии топливо-энергетических ресурсов занимает важное место в тематике работ научно-исследовательских организаций, проектных и промышленных фирм всех стран мира [1].

В соответствии с ГОСТ Р513 80–99 (Энергосбережение) в настоящее время сертификации по показателям энергетической эффективности подлежит широкий перечень электрических машин, продукции машиностроительной промышленности, транспортных средств, объектов коммунального хозяйства и др.

Теоретические исследования и практические результаты показывают, что при оптимальном управлении уменьшение затрат энергии (расхода топлива) может достигать от 10 до 40% по сравнению с традиционно используемыми управляющими воздействиями. Кроме того, в динамических режимах, характеризуемых меньшими энергетическими затратами, снижаются механические и тепловые нагрузки, что ведет к повышению долговечности и безопасности эксплуатации объектов.

К наиболее энергоемким объектам относятся тепловые аппараты, машины с электроприводами, т.е. большинство видов технологических установок в машиностроительной, химической, металлургической, строительной и других отраслях промышленности, а также перемещающиеся объекты и транспортные средства [2]. Эффект энергосбережения при использовании оптимального управления достигается за счет следующих факторов:

− оптимальное ведение динамических режимов при всех состояниях функционирования, т.е. в случае изменения модели динамики объекта или условий (исходных данных) задачи управления оперативно (в реальном времени) находится новое решение и реализуются энергосберегающие управляющие воздействия для существующей ситуации;

− достижение задаваемого конечного значения вектора фазовых координат точно в требуемый момент времени, который, в свою очередь, выбирается оптимальным;

− использование оптимальной стратегии реализации энергосберегающего управления (программной, позиционной или другой) для каждого состояния функционирования;

− создание локальных и бортовых систем энергосберегающего управления на базе простых и дешевых микропроцессорных устройств.

Таким образом можно сделать вывод: что для создания систем энергосберегающего управления требуется решить комплекс теоретических задач, основными из них являются [1]:

− полный анализ задач оптимального управления для типовых моделей динамики энергоемких объектов, различных видов минимизируемых функционалов и стратегий реализации управляющих воздействий, ограничений на управления и фазовые координаты, встречающиеся в реальных условиях;

− анализ энергосберегающего управления машинами и аппаратами на множестве состояний функционирования, когда возможны изменения моделей объектов стратегий и функционалов;

− анализ энергосберегающего управления многомерными объектами;

− идентификация моделей динамических режимов, в том числе нелинейных и с временным запаздыванием по каналу управления, пригодных для использования в системах энергосберегающего управления.

Библиографический список

1. Кольтюков, Н. А. Оптимальное энергосберегающее управление смесительными машинами предприятий по производству и переработке полимерных материалов : дис. … канд. техн. наук / Н. А. Кольтюков ; ТГТУ. – Тамбов, 2002. – 174 с.

2. Белоусов, О. А. Энергосберегающее управление группой мощных аппаратов с электронагревом / О. А. Белоусов, Н. А. Кольтюков, Ю. Т. Зырянов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 5(65). – С. 27 – 29.

3. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 55 – 59.

4. Данилов, С. Н. Алгоритм сопровождения с реконфигурацией модели / С. Н. Данилов, Н. А. Кольтюков, Р. А. Ефремов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 3 – С. 418 – 423.

5. Данилов, С. Н. Мультимодельный алгоритм сопровождения со сниженными вычислительными затратами / С. Н. Данилов, Н. А. Кольтюков, Р. А. Ефремов // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : тез. докл. 2 Междунар конф с элементами научной школы. – Тамбов, 22 – 24 апреля 2015 года. – С. 304–305.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

АЛГОРИТМ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Н. А. Дегтярев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: degtyarewnikolay@mail.ru)

В информационно-измерительных системах дальномеры применяются для точного определения дистанции между двумя объектами. Функционирование дальномерного канала основывается на принципе измерения времени распространения электромагнитного сигнала от источника излучения до приемного устройства. В качестве сигналов могут использоваться различные типы излучений, включая радиоволны, оптические импульсы и другие виды электромагнитных волн.

Алгоритм дальномерного канала включает в себя несколько этапов.

1. Генерация сигнала: передатчик генерирует сигнал, который будет использоваться для измерения расстояния.
2. Отправка сигнала: сигнал передается в пространство и достигает приемника.
3. Измерение времени распространения сигнала: приемник фиксирует время, за которое сигнал прошел от передатчика до него.
4. Расчет расстояния: на основе измеренного времени распространения и известной скорости распространения сигнала (например, скорости света) вычисляется расстояние до передатчика.

Для разработки алгоритма дальномерного канала используется модель состояния, предназначенная для оценки фазовых координат воздушных судов (ВС) по линии визирования. Данная модель позволяет проводить комплексный анализ ряда ключевых параметров, включая дальность до ВС, скорость сближения, ускорение, а также скорости и ускорения самого воздушного судна. Кроме того, модель учитывает угол наклона и угловую скорость наклона, путевой угол и скорость его изменения, а также углы линии визирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях, включая их производные по времени. Этот многофакторный подход обеспечивает высокую точность и надежность оценки динамических характеристик ВС, что является критически важным для эффективной работы дальномерного канала [1, 2].

$$
\left.
\begin{aligned}
&Д(k+1) = Д(k) + V(k)T + 0{,}5a(k)\tau^2; \quad V(k+1) = V(k) + a(k)\tau;\\
&a(k+1) = V_{ц}(k)(\sin\varepsilon_{в}(k)\cos\theta(k)(\omega_{\theta}(k) - \omega_{в}(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_{г}(k))) +\\
&\quad + \sin\theta(k)\cos\varepsilon_{в}(k)(\omega_{в}(k) - \omega_{\theta}(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_{г}(k)) +\\
&\quad + \cos\varepsilon_{в}(k)\cos\theta(k)\sin(\varphi(k) - \varepsilon_{г}(k))(\omega_{г}(k) - \omega_{\varphi}(k)) + \xi_{a}(k);\\
&V_{ц}(k+1) = V_{ц}(k) + a_{ц}(k)\tau; \quad a_{ц}(k+1) = (1-\alpha_{ф1})a_{ц}(k) + \xi_{a_{ц}}(k);\\
&\theta(k+1) = \theta(k) + \omega_{\theta}(k)\tau; \quad \omega_{\theta}(k+1) = (1-\alpha_{ф2})\omega_{\theta}(k) + \xi_{\omega_{\theta}}(k);\\
&\varphi(k+1) = \varphi(k) + \omega_{\varphi}(k)\tau; \quad \omega_{\varphi}(k+1) = (1-\alpha_{ф3})\omega_{\varphi}(k) + \xi_{\omega_{\varphi}}(k);\\
&\varepsilon_{в}(k+1) = \varepsilon_{в}(k) + \omega_{в}(k)\tau; \quad \omega_{в}(k+1) = (1-\alpha_{ф4})\omega_{в}(k) + \xi_{\omega_{в}}(k);\\
&\varepsilon_{г}(k+1) = \varepsilon_{г}(k) + \omega_{г}(k)\tau; \quad \omega_{г}(k+1) = (1-\alpha_{ф5})\omega_{г}(k) + \xi_{\omega_{г}}(k).
\end{aligned}
\right\} \qquad (1)
$$

В выражении (1) ξ_{a}, $\xi_{a_{ц}}$, $\xi_{\omega_{\theta}}$, $\xi_{\omega_{\varphi}}$, $\xi_{\omega_{в}}$, $\xi_{\omega_{г}}$, $\xi_{\omega_{в}}$ и $\xi_{\omega_{г}}$ – центрированные гауссовские шумы; $\alpha_{ф1}$, $\alpha_{ф2}$, $\alpha_{ф3}$, $\alpha_{ф4}$ и $\alpha_{ф5}$ – постоянные маневра ускорения цели, угловой скорости наклона, скорости путевого угла, скорости линии визирования.

Для обеспечения корректной оценки фазовых координат, представленных в модели (1), необходимо осуществлять измерения дальности, угла наклона и путевого угла [3]. На основании модели состояния (1) и доступных измерений, а также с учетом теоретических основ калмановской фильтрации [1, 2, 4], был разработан следующий алгоритм фильтрации:

$$Д_{о}(k) = Д_{э}(k) + К_{д11}(k)\Delta Д(k) + К_{д12}(k)\Delta\theta(k) + К_{д13}(k)\Delta\varphi(k); \qquad (2)$$

$$V_{о}(k) = V_{э}(k) + К_{д21}(k)\Delta Д(k) + К_{д22}(k)\Delta\theta(k) + К_{д23}(k)\Delta\varphi(k); \qquad (3)$$

$$a_{о}(k) = a_{э}(k+1) + К_{д31}(k)\Delta Д(k) + К_{д32}(k)\Delta\theta(k) + К_{д33}(k)\Delta\varphi(k); \qquad (4)$$

$$\theta_{о}(k) = \theta_{э}(k) + К_{\theta41}(k)\Delta\theta(k) + К_{д42}(k)\Delta\theta(k) + К_{д43}(k)\Delta\varphi(k); \qquad (5)$$

$$\omega_{\theta_{цо}}(k) = \omega_{\theta_{цэ}}(k) + К_{\theta51}(k)\Delta\theta(k) + К_{д52}(k)\Delta\theta(k) + К_{д53}(k)\Delta\varphi(k); \qquad (6)$$

$$\varphi_{о}(k) = \varphi_{э}(k) + К_{\theta61}(k)\Delta\theta(k) + К_{д62}(k)\Delta\theta(k) + К_{д63}(k)\Delta\varphi(k); \qquad (7)$$

$$\omega_{\varphi_{цо}}(k) = \omega_{\varphi_{цэ}}(k) + К_{\theta71}(k)\Delta\theta(k) + К_{д72}(k)\Delta\theta(k) + К_{д73}(k)\Delta\varphi(k). \qquad (8)$$

В выражениях [2 – 8] $\Delta Д(k)$, $\Delta\theta(k)$, $\Delta\varphi(k)$ – невязки измерений; $Д_{э}(k)$, $V_{э}(k)$, $a_{э}(k)$, $\theta_{э}(k)$, $\varphi_{э}(k)$, $\omega_{\theta_{цэ}}(k)$, $\omega_{\theta_{цэ}}(k)$ – экстраполированные значения фазовых координат; $К_{д11}(k) \ldots К_{д71}(k)$ – коэффициенты усиления невязок измерения.

Таким образом, разработанный алгоритм дальномерного канала [2 – 8] демонстрирует существенно повышенную точность оценки фазовых координат воздушного судна по сравнению с существующими алгоритмическими решениями. Внедрение данного алгоритма [2 – 8] способствует значительному улуч-

шению качества выполнения задач по организации воздушного движения, что выражается в увеличении пропускной способности системы при сохранении заданного уровня безопасности.

Библиографический список

1. Indication of relative motion intensity of aerodynamic object and meters with different physical nature / S. N. Danilov, S. P. Moskvitin, Yu. N. Panasyuk, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

2. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.

3. Synthesis of channel tracking for random process parameters under discontinuous variation / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032112.

4. Development and research of the rangefinder of the information and measurement system of air traffic control based on data from on-board sensors of the aircraft / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, M. P. Belyaev, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

5. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.

6. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

АЛГОРИТМ УГЛОМЕРНОГО КАНАЛА СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Н. А. Дегтярев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: degtyarewnikolay@mail.ru)

Алгоритм угломерного канала со случайной структурой используется в информационно-измерительных системах для определения угловых координат воздушных судов (ВС). Он основан на измерении углов между направлением на ВС и фиксированной осью системы координат. Структура алгоритма может меняться в зависимости от условий работы системы, что позволяет адаптировать ее к различным ситуациям.

При разработке алгоритма угломерного канала необходимо учитывать следующие факторы:

1. Точность измерения углов.
2. Влияние помех и шумов на точность определения угловых координат.
3. Изменение условий работы системы (например, изменение расстояния до ВС, скорости и ускорения).
4. Необходимость адаптации алгоритма к различным режимам работы.

Также важно провести анализ возможных ошибок и разработать методы их минимизации. Это может включать в себя фильтрацию шумов, коррекцию ошибок измерения и адаптацию алгоритма к изменяющимся условиям.

Для разработки алгоритма угломерного канала применяем трехмерную и двухмерную модели состояний, которые позволяют осуществлять оценку фазовых координат воздушных судов (ВС) [1 – 3]:

$$\left.\begin{aligned}&\varphi_1(k)=\varphi_1(k-1)+\omega_1(k-1)T+0{,}5\beta_1(k-1)T^2;\\&\omega_1(k)=\omega_1(k-1)+\beta_1(k-1)T;\ \ \beta_1(k)=(1-\alpha_{\phi 1}T)\beta_1(k-1)+\xi_a(k-1);\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\varphi_2(k)=\varphi_2(k-1)+\omega_2(k-1)T;\ \omega_2(k)=(1-\alpha_{\phi 2}T)\omega_2(k-1)+\xi_\omega(k-1); \quad (2)$$

$$\varphi(k)=\sum_{m=1}^{2}W_m(k-1)\varphi_m(k-1),\ m=1,\,2;\ \ k=1,\,2,\,...; \quad (3)$$

где φ, ω, β – азимут, скорость и ускорение изменения азимута; W_m – весовые коэффициенты оценки фильтрации; $\alpha_{\phi 1}$ и $\alpha_{\phi 2}$ – постоянные времени маневра; $\xi_a(k-1)$ и $\xi_\omega(k-1)$ – гауссовские шумы.

Для обеспечения оценки фазовых координат (1, 2, 3) должен измеряться азимут ВС $\varphi_и$ [1, 4]. На основании модели состояния (1, 2, 3), измерения $\varphi_и$ и с учетом выражений калмановской фильтрации [1, 2, 4] получен следующий алгоритм фильтрации:

$$\left.\begin{aligned}&\varphi_{10}(k)=\varphi_{1э}(k)+K_{1\phi 11}\Delta\varphi_1(k);\ \ \omega_{10}(k)=\omega_{1э}(k)+K_{1\phi 21}\Delta\varphi_1(k);\\&\beta_{10}(k)=\beta_{1э}(k)+K_{1\phi 31}\Delta\beta(k);\ \Delta\varphi_1(k)=\varphi_{1и}(k)-\varphi_{1э}(k);\\&\varphi_{1э}(k)=\varphi_{10}(k-1)+\omega_{10}(k)\tau+\beta_0(k)\tau^2/2;\ \omega_{1э}(k)=\omega_{10}(k-1)+\beta_{10}(k)\tau;\\&\beta_{1э}(k)=\beta_{10}(k-1);\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

$$\left.\begin{aligned}&\varphi_{20}(k)=\varphi_{2э}(k)+K_{2\phi 11}\Delta\varphi_2(k);\ \ \omega_{20}(k)=\omega_{2э}(k)+K_{2\phi 21}\Delta\varphi_2(k);\\&\Delta\varphi_2(k)=\varphi_{2и}(k)-\varphi_{2э}(k);\ \ \varphi_{2э}(k)=\varphi_{20}(k-1)+\omega_{20}(k)\tau;\\&\omega_{2э}(k)=\omega_{20}(k-1);\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

$$\varphi_0(k)=\sum_{m=1}^{2}W_{0m}(k-1)\varphi_{0m}(k-1),\ m=1,\,2;\ \ k=1,\,2,\,...; \quad (6)$$

где (2) $\Delta\varphi(k)$ – невязка измерения; $\varphi_э(k)$, $\omega_э(k)\,\beta_э(k)$ – экстраполированные значения фазовых координат; $K_д(k)$ – коэффициенты усиления невязок измерения.

На основе разработанных алгоритмов (4 – 6) проведено имитационное моделирование для анализа маневрирования воздушного судна в конфигурации «большая коробочка». Полученные результаты представлены на рис. 1, где визуализированы графики изменения среднеквадратичной погрешности (СКП) азимута в зависимости от времени. График *1* демонстрирует динамику погрешности при использовании модели состояния (1) в угломерном канале, график *2* иллюстрирует аналогичные данные при применении модели состояния (2), а график *3* показывает результаты моделирования при комбинированном использовании моделей состояния (1), (2) и (3).

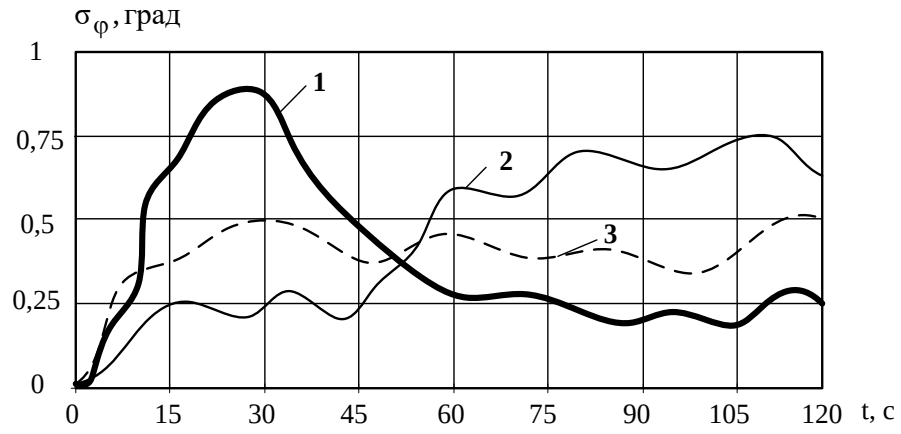


Рис. 1. Зависимость реального СКП азимута от времени

Внедрение двух фильтров со случайной структурой угломерного канала значительно повышает точность траекторной обработки данных воздушных судов на всех этапах выполнения маневра «большая коробочка». Этот метод демонстрирует высокую эффективность благодаря интеграции стохастических алгоритмов, что способствует снижению погрешностей и увеличению общей надежности системы навигации и управления.

Библиографический список

1. Indication of relative motion intensity of aerodynamic object and meters with different physical nature / S. N. Danilov, S. P. Moskvitin, Yu. N. Panasyuk, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

2. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.

3. Synthesis of channel tracking for random process parameters under discontinuous variation / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032112

4. Development and research of the rangefinder of the information and measurement system of air traffic control based on data from on-board sensors of the aircraft / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, M. P. Belyaev, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ДАЛЬНОСТИ СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКЕ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Н. А. Дегтярев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: degtyarewnikolay@mail.ru)

Измеритель дальности со случайной структурой использует вероятностные методы для обработки информации о дальности до воздушных судов. В таких системах структура алгоритма может изменяться в зависимости от условий работы, например, от характеристик цели, окружающей среды и т.д.

Алгоритм может включать в себя следующие этапы:

1. Сбор данных: измеритель дальности получает данные о дальности до воздушных судов от различных источников, таких как радары, лидары и другие измерительные устройства.
2. Предварительная обработка данных: данные очищаются от шумов и помех, а также приводятся к единому формату.
3. Выбор структуры алгоритма: на основе анализа данных выбирается наиболее подходящая структура алгоритма для обработки. Это может быть, например, фильтр Калмана, алгоритм максимального правдоподобия или другие методы.
4. Траекторная обработка: выбранный алгоритм используется для оценки траектории движения воздушных судов на основе полученных данных о дальности.
5. Оценка параметров траектории: на основе обработанных данных определяются параметры траектории, такие как скорость, направление движения и т.д.
6. Принятие решений: на основе полученных параметров траектории принимаются решения о дальнейших действиях, например, о необходимости оповещения диспетчеров или корректировки полетного задания.

Измерители дальности со случайной структурой могут обеспечить более точную и надежную траекторную обработку воздушных судов в условиях неопределенности и изменчивости среды. Однако такие системы могут быть более сложными в реализации и настройке, чем системы с фиксированной структурой.

В рамках актуальной задачи обработки информации представляется необходимым синтез оптимальных алгоритмов оценивания стохастических процессов, характеризующихся скачкообразным изменением структуры в случайные моменты времени. Алгоритмы сопровождения, учитывающие теорию систем со случайной скачкообразной структурой, позволяют осуществлять обработку информации с применением нескольких моделей для совместной оценки фазовых координат воздушных судов.

Разработанные алгоритмы включают двухмерный и трехмерный фильтры, обеспечивающие совместную оценку дальности на основе выражений

калмановской фильтрации. Этот подход позволяет интегрировать данные из различных источников, учитывая возможные изменения в структуре системы, что способствует повышению точности и надежности оценки фазовых координат.

Алгоритм функционирования первого фильтра для оценки дальности, скорости и ускорения по линии визирования:

$$Д_{о}(k+1) = Д_{э1}(k+1) + K_{у11}(k+1)\Delta Д_{1}(k+1); \quad (1)$$

$$V_{о1}(k+1) = V_{э1}(k+1) + K_{у21}(k+1)\Delta V_{1}(k+1); \quad (2)$$

$$a_{о1}(k+1) = a_{э}(k+1) + K_{у31}(k+1)\Delta Д_{1}(k+1); \quad (3)$$

$$Д_{э1}(k+1) = Д_{о1}(k) + V_{о1}(k)\tau + 0{,}5a_{о}(k)\tau^{2}; \quad (4)$$

$$V_{э1}(k+1) = V_{о1}(k) + a_{о}(k)\tau; \quad (5)$$

$$a_{э}(k+1) = (1-\alpha_{ф}\tau)a_{о}(k); \quad (6)$$

$$\Delta Д_{1}(k+1) = Д_{и}(k+1) - Д_{э1}(k+1). \quad (7)$$

Алгоритм функционирования второго фильтра для оценки дальности и скорости:

$$Д_{о2}(k+1) = Д_{э2}(k+1) + K_{у11}(k+1)\Delta Д_{2}(k+1); \quad (8)$$

$$V_{о2}(k+1) = V_{э2}(k+1) + K_{у21}(k+1)\Delta V_{2}(k+1); \quad (9)$$

$$Д_{э2}(k+1) = Д_{о2}(k) + V_{о2}(k)\tau; \quad (10)$$

$$V_{э2}(k+1) = (1-\alpha_{ф}\tau)V_{о2}(k); \quad (11)$$

$$\Delta Д_{2}(k+1) = Д_{и}(k+1) - Д_{э2}(k+1). \quad (12)$$

В рамках настоящего исследования предлагается разработка модели системы для совместной оценки дальности воздушного судна по линии визирования при наличии случайной скачкообразной структуры сигнала. Исследование базируется на применении двух альтернативных моделей, что позволяет достичь более высокой точности и надежности оценки

$$Д_{о}(k) = \sum_{m=1}^{2} W_{m}(k-1)Д_{оm}(k-1), \ m = 1, 2, \quad (13)$$

где W_{m} – весовые коэффициенты оценок фильтрации 1 и 2 фильтров.

Таким образом, разработан алгоритм совместной обработки данных, полученных от двухмерного и трехмерного фильтров. Данный алгоритм позволяет значительно улучшить точностные характеристики измерительной системы дальности по сравнению с традиционными фильтрационными методами. К основным недостаткам измерителей дальности со случайной структурой можно отнести сложность настройки и реализации, а также необходимость дополнительных вычислительных ресурсов для работы таких систем. Кроме того, эффективность системы может снижаться при неправильном выборе структуры алгоритма в зависимости от условий работы.

Измерители дальности со случайной структурой являются перспективным направлением развития систем траекторной обработки воздушных судов. Они могут обеспечить более точную и надежную работу в условиях неопределенности и изменчивости среды. Однако для их эффективного использования необходимо учитывать их особенности и правильно настраивать параметры.

Библиографический список

1. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.

2. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

3. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.

4. Indication of relative motion intensity of aerodynamic object and meters with different physical nature / S. N. Danilov, S. P. Moskvitin, Yu. N. Panasyuk, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА С УЧЕТОМ ЕГО ОРИЕНТАЦИИ

Н. А. Дегтярев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: degtyarewnikolay@mail.ru)

Математическая модель движения воздушного судна с учетом его ориентации представляет собой сложную систему, включающую несколько ключевых компонентов. Эти компоненты взаимосвязаны и образуют единую динамическую систему, описывающую пространственное поведение воздушного судна.

К основным компонентам модели можно отнести:

1. Координаты и положение – положение воздушного судна в пространстве определяется тремя декартовыми координатами (например, широтой, долготой и высотой).

2. Скорость и ускорение – линейная скорость воздушного судна в трехмерном пространстве задается вектором, состоящим из продольной, поперечной и вертикальной составляющих. Ускорение воздушного судна является производной скорости по времени и зависит от работы двигателей и внешних факторов, таких как аэродинамическое сопротивление и подъемная сила.

3. Уравнения движения – описывают изменение координат и углов ориентации воздушного судна во времени. Они могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений, учитывающих силы, такие как сила тяжести, аэродинамические силы и тяга двигателей.

4. Динамические характеристики – масса и моменты инерции определяют динамическое поведение воздушного судна. Коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы зависят от угла атаки, конфигурации крыла и других факторов, что позволяет моделировать взаимодействие воздушного судна с окружающей средой.

5. Внешние условия – внешние факторы, такие как ветер, турбулентность, атмосферное давление и температура, необходимо учитывать при создании математической модели. Эти факторы существенно влияют на динамику и устойчивость воздушного судна.

Для создания математических моделей движения воздушного судна с учетом его ориентации используем следующую модель состояния в дискретном времени для оценивания фазовых координат целей по линии визирования: дальности Д, скорости сближения V, ускорения a, скорости цели $V_{\text{ц}}$, ускорения цели $a_{\text{ц}}$, угла наклона θ, угловой скорости наклона ω_θ, путевого угла φ, скорости путевого угла ω_φ, угла линии визирования в вертикальной плоскости $\varepsilon_{\text{в}}$, скорости линии визирования в вертикальной плоскости $\omega_{\text{в}}$, угла линии визирования в горизонтальной плоскости $\varepsilon_{\text{г}}$, скорости линии визирования горизонтальной плоскости $\omega_{\text{г}}$

$$
\left.
\begin{aligned}
&\text{Д}(k+1) = \text{Д}(k) + V(k)T + 0{,}5a(k)\tau^2;\\
&V(k+1) = V(k) + a(k)\tau;\\
&a(k+1) = V_{\text{ц}}(k)(\sin\varepsilon_{\text{в}}(k)\cos\theta(k)(\omega_\theta(k) - \omega_{\text{в}}(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_{\text{г}}(k))) +\\
&\qquad + \sin\theta(k)\cos\varepsilon_{\text{в}}(k)(\omega_{\text{в}}(k) - \omega_\theta(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_{\text{г}}(k)) +\\
&\qquad + \cos\varepsilon_{\text{в}}(k)\cos\theta(k)\sin(\varphi(k) - \varepsilon_{\text{г}}(k))(\omega_{\text{г}}(k) - \omega_\varphi(k)) + \xi_{\text{a}}(k);\\
&V_{\text{ц}}(k+1) = V_{\text{ц}}(k) + a_{\text{ц}}(k)\tau;\\
&a_{\text{ц}}(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}1})a_{\text{ц}}(k) + \xi_{\text{a}_{\text{ц}}}(k);\\
&\theta(k+1) = \theta(k) + \omega_\theta(k)\tau;\\
&\omega_\theta(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}2})\omega_\theta(k) + \xi_{\omega_\theta}(k);\\
&\varphi(k+1) = \varphi(k) + \omega_\varphi(k)\tau;\\
&\omega_\varphi(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}3})\omega_\varphi(k) + \xi_{\omega_\varphi}(k);\\
&\varepsilon_{\text{в}}(k+1) = \varepsilon_{\text{в}}(k) + \omega_{\text{в}}(k)\tau;\\
&\omega_{\text{в}}(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}4})\omega_{\text{в}}(k) + \xi_{\omega_{\text{в}}}(k);\\
&\varepsilon_{\text{г}}(k+1) = \varepsilon_{\text{г}}(k) + \omega_{\text{г}}(k)\tau;\\
&\omega_{\text{г}}(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}5})\omega_{\text{г}}(k) + \xi_{\omega_{\text{г}}}(k).
\end{aligned}
\right\} \qquad (1)
$$

Для обеспечения оценки фазовых координат (1) должны измеряться дальность $Д_и$, скорость цели $V_ц$, угол наклона $\theta_{ци}$ путевой угол $\varphi_{ци}$, угол линии визирования в вертикальной плоскости $\varepsilon_{ви}$, угол линии визирования в горизонтальной плоскости $\varepsilon_{ги}$.

Обобщенные векторы состояния и наблюдения:

$$X = \left[Д \quad V \quad a \quad V_ц \quad a_ц \quad \theta_ц \quad \varphi_ц \quad \omega_{\theta_ц} \quad \omega_{\varphi_ц} \quad \varepsilon_в \quad \omega_в \quad \varepsilon_г \quad \omega_в\right]^T; \qquad (2)$$

$$z = \left[Д_и \quad V_{ци} \quad \theta_{ци} \quad \varphi_{ци} \quad \varepsilon_{ви} \quad \varepsilon_{ги}\right]^T. \qquad (3)$$

С учетом декомпозиции обобщенных векторов состояния (2) и наблюдения (3) модели систем фильтров дальномерного канала примут следующий вид:

– модель системы оценки дальности, скорости и ускорения

$$\left.\begin{aligned} &Д(k+1) = Д(k) + V(k)T + 0{,}5a(k)\tau^2; \\ &V(k+1) = V(k) + a(k)\tau; \\ &a(k+1) = V_ц(k)(\cos\theta(k)\sin\varepsilon_в(k)(\omega_\theta(k) - \omega_в(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_г(k))) + \\ &+ \sin\theta(k)\cos\varepsilon_в(k)(\omega_в(k) - \omega_\theta(k)\cos(\varphi(k) - \varepsilon_г(k)) + \\ &+ \cos\theta(k)\cos\varepsilon_в(k)\sin(\varphi(k) - \varepsilon_г(k))(\omega_г(k) - \omega_\varphi(k)) + \xi_a(k); \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

$$Д_и(k+1) = Д(k+1) + \xi_{Д_и}(k+1); \qquad (5)$$

– модель системы оценки скорости и ускорения цели:

$$\left.\begin{aligned} &V_ц(k+1) = V_ц(k) + a_ц(k)\tau; \\ &a_ц(k+1) = (1 - \alpha_ф\tau)a_ц(k) + \xi_{a_ц}(k); \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

$$V_{ци}(k+1) = V_ц(k+1) + V_{ци}(k+1); \qquad (7)$$

– модель системы оценки угла наклона и угловой скорости наклона цели:

$$\left.\begin{aligned} &\theta(k+1) = \theta(k) + \omega_\theta(k)\tau; \\ &\omega_\theta(k+1) = (1 - \alpha_{ф2})\omega_\theta(k) + \xi_{\omega_\theta}(k); \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

$$\theta_и(k+1) = \theta(k+1) + \xi_\theta(k+1); \qquad (9)$$

– модель системы оценки путевого угла и угловой скорости путевого угла цели:

$$\left.\begin{aligned} &\varphi(k+1) = \varphi(k) + \omega_\varphi(k)\tau; \\ &\omega_\varphi(k+1) = (1 - \alpha_{ф3})\omega_\varphi(k) + \xi_{\omega_\varphi}(k); \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

$$\varphi_и(k+1) = \varphi(k+1) + \xi_{\varphi_и}(k+1); \qquad (11)$$

– модель системы оценки угла и скорости линии визирования в вертикальной плоскости:

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{в}(k+1)&=\varepsilon_{в}(k)+\omega_{в}(k)\tau;\\ \omega_{в}(k+1)&=(1-\alpha_{ф4})\omega_{в}(k)+\xi_{\omega_{в}}(k);\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{в}(k+1)=\varepsilon_{в}(k+1)+\xi_{\varphi_{вц}}(k+1); \quad (13)$$

– модель системы оценки угла и скорости линии визирования в горизонтальной плоскости

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{г}(k+1)&=\varepsilon_{г}(k)+\omega_{г}(k)\tau;\\ \omega_{г}(k+1)&=(1-\alpha_{ф5})\omega_{г}(k)+\xi_{\omega_{г}}(k);\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{г}(k+1)=\varepsilon_{г}(k+1)+\xi_{\varphi_{гц}}(k+1). \quad (15)$$

Таким образом, разработанные модели пригодны для синтеза алгоритма дальномерного канала АС УВД, позволяющего оценивать дальность с точностью, превосходящей точность существующих алгоритмов вследствие лучшего соответствия моделей процессу изменения координат ВС.

Библиографический список

1. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.
2. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах: учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – 84 с.
3. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
4. Synthesis of channel tracking for random process parameters under discontinuous variation / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032112.

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ Massive MIMO В ДИАПАЗОНЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН: АППАРАТНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ПУТИ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

К. А. Закиров, В. С. Коршунова

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: zakirov.ka@dvfu.ru)

Технология Massive MIMO является одним из ключевых элементов стандартов беспроводной связи пятого и шестого поколений. Перенос ее реализации в диапазон миллиметровых волн (24…100 ГГц) позволяет существенно

увеличить пропускную способность каналов и использовать компактные антенные решетки с большим числом элементов. Вместе с тем данный диапазон характеризуется рядом серьезных физических и аппаратных ограничений, преодоление которых представляет актуальную научно-техническую задачу [1].

Первым и наиболее принципиальным ограничением является высокое затухание сигнала в свободном пространстве, описываемое формулой Фрииса: потери пропорциональны квадрату частоты, что в диапазоне 28…60 ГГц приводит к дополнительным потерям на 20…30 дБ по сравнению с диапазоном ниже 6 ГГц. Кроме того, молекулярное поглощение атмосферы на частоте около 60 ГГц достигает 15 дБ/км, существенно ограничивая дальность связи [2]. Компенсация этих потерь требует формирования узких направленных лучей с высоким коэффициентом усиления антенной решетки, что предъявляет жесткие требования к точности управления фазой каждого излучающего элемента.

Вторым ограничением является аппаратная сложность цифровой обработки сигналов. В полностью цифровой архитектуре Massive MIMO каждый антенный элемент требует отдельной цепочки аналого-цифрового преобразования. При числе элементов 64 – 256 и полосе сигнала порядка 500 МГц…2 ГГц суммарная вычислительная нагрузка и энергопотребление становятся неприемлемыми для практической реализации [3]. Аналоговые фазовращатели, применяемые в аналоговых архитектурах, вносят амплитудно-фазовые ошибки и характеризуются нелинейностью, деградирующей с ростом частоты.

Наиболее перспективным подходом к преодолению указанных ограничений является гибридная архитектура формирования луча, в которой аналоговая фазовая решетка сочетается с цифровой многолучевой обработкой на базе уменьшенного числа ВЧ-цепочек. Такая схема позволяет сократить количество АЦП/ЦАП в 4 – 8 раз при сохранении спектральной эффективности, близкой к полностью цифровому решению [1]. Дополнительным направлением является применение элементной базы на основе арсенида галлия (GaAs) и нитрида галлия (GaN), обеспечивающей сниженные шумовые характеристики и повышенную линейность в миллиметровом диапазоне.

Важную роль в компенсации аппаратных несовершенств играют алгоритмы цифровой калибровки и предыскажения сигнала. Методы на основе разреженного восстановления (Compressed Sensing) и машинного обучения позволяют существенно снизить требования к точности фазовращателей и АЦП за счет адаптивной коррекции ошибок в цифровом домене [2]. Отдельного внимания заслуживают алгоритмы управления лучом на основе кодовых книг, позволяющие значительно сократить накладные расходы на процедуру поиска луча (Beam Sweeping) в условиях мобильного канала.

Таким образом, реализация Massive MIMO в миллиметровом диапазоне сопряжена с комплексом взаимосвязанных аппаратных ограничений: высоким затуханием сигнала, сложностью цепей АЦП/ЦАП и нелинейностью фазовращателей. Перспективными путями их преодоления являются гибридные архитектуры формирования луча, современная нитридная и арсенидная элементная база, а также интеллектуальные алгоритмы калибровки и управления лучом.

Совокупное применение данных подходов открывает реальную возможность построения практических систем Massive MIMO мм-диапазона для сетей 5G/6G.

Библиографический список

1. Bjornson, E. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency / E. Bjornson, J. Hoydis, L. Sanguinetti. – Boston : Now Publishers, 2017. – 241 p.

2. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! / T. S. Rappaport, et al. // IEEE Access. – 2013. – V. 1. – P. 335 – 349.

3. Sohrabi, F. Hybrid Digital and Analog Beamforming Design for Large-Scale Antenna Arrays / F. Sohrabi, W. Yu // IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing. – 2016. – V. 10, No. 3. – P. 501 – 513.

АНТЕННА КАНАЛА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

А. А. Иванков[1], Я. А. Бойко[2]

[1]Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: ivankov.a.a@bk.ru)
[2]Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, Тамбов, Россия
(e-mail: krivol4@yandex.ru)

Современные системы дистанционного управления беспилотными транспортными средствами используют цифровые каналы передачи данных в широком диапазоне частот. Для их устойчивой работы необходимо применять широкополосные антенны с коэффициентом направленного действия (КНД) не менее 10. Логопериодическая антенна удовлетворяет указанным критериям, но имеет большие размеры (длина – 1,3 м) [1]. Цилиндрическая спиральная антенна (ЦСА) при компактных размерах и приемлемых направленных свойствах имеет высокое значение коэффициента стоячих волн (КСВ) на границах диапазона [2]. Компромиссным вариантом может служить коническая спиральная антенна (КСА), имеющая практически равномерный КСВ во всем диапазоне частот и приемлемые размеры.

Проведем расчет КСА на 720…1050 МГц с КНД = 10 [3]. Рассчитаем конструктивные параметры, представленные на рис. 1: d_m – расстояние между витками спирали; R_m – радиус m-го витка; L – длина спирали; l_m – длина m-го витка спирали; α – угол подъема спирали; n – количество витков; $2r_0$ – диаметр провода спирали; $2R_д$ – диаметр диска; 2β – угол при вершине конуса.

По методике, изложенной в [2], получим параметры эквивалентной ЦСА: λ_{max} = 0,43 м, λ_{min} = 0,43 м, $\lambda_{ср}$ = 0,35 м – максимальная, минимальная и средняя длина волны; L' = 0,24 м – длина эквивалентной ЦСА; d = 0,044 м – шаг спирали; n' = 6 – количество витков эквивалентной ЦСА.

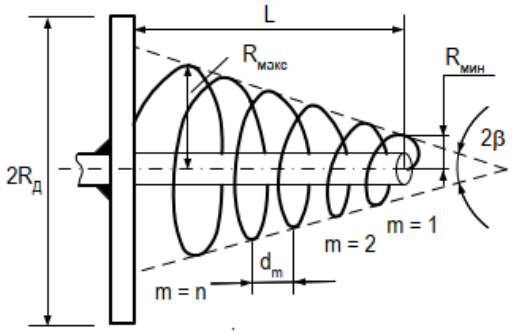


Рис. 1. Коническая спиральная антенна

Параметры КСА определим по формулам [3]:

$$\alpha = \arcsin\frac{L'}{d} \approx 7°;\ 2\beta = 2\arcsin\frac{0{,}55}{2\pi(n'-1)\mathrm{tg}\alpha} = 16°;$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{1{,}3\lambda_{max}}{0{,}75\lambda_{min}}\right)}{2\pi\mathrm{tg}\alpha\sin\beta} + 1 = 10;\ R_{min} = \frac{0{,}75\lambda_{min}\,\mathrm{tg}\alpha\sin\beta}{e^{2\pi\mathrm{tg}\alpha\sin\beta} - 1} = 0{,}04 \text{ м};$$

$$L = R_{min}e^{2\pi n\mathrm{tg}\alpha\sin\beta} - 1 = 0{,}42 \text{ м};$$

$$R_{max} = R_{min}e^{2\pi n\mathrm{tg}\alpha\sin\beta} = 0{,}07 \text{ м}.$$

Диаметр диска экрана: $2R_д = (0{,}9\ldots1{,}1)\lambda_{max} \approx 0{,}45$ м.

Входное сопротивление КСА:

$$R_{вх} = 140\frac{l_m}{\lambda_m} = 140 \text{ Ом}.$$

Согласование входного сопротивления антенны с волновым сопротивлением фидера удобно выполнить с помощью микрополоскового согласующего устройства, расположив его на диске экрана с противоположной от антенны стороне.

Библиографический список

1. Пат. 2571607C1 Российская Федерация, МПК H01Q 11/10. Микроволновая логопериодическая антенна / Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Кужекин Д. В. ; заявитель и патентообладатель Калинград. гос. техн. ун-т. – № 2014129990/08 ; заявл. 21.07.2014 ; опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. – 15 с.

2. Иванков, А. А. Широкополосная направленная антенна системы передачи данных автоматизированных объектов теплоэнергетического комплекса / А. А. Иванков, Д. С. Попова // Цифровая трансформация в энергетике : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. для студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов, 2025. – С. 43 – 45.

3. Панасюк, Ю. Н. Основы автоматизации проектирования устройств СВЧ и антенн [Электронный ресурс, мультимедиа] : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2014. – 240 с.

МИКРОПОЛОСКОВОЕ СОГЛАСУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО КОНИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

А. А. Иванков[1], А. С. Полякова[2]

[1]Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: ivankov.a.a@bk.ru)
[2]Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина,
Тамбов, Россия
(e-mail: nastya200388@bk.ru)

В цифровых каналах передачи данных удобно использовать широкополосные конические спиральные антенны (КСА), обладающие хорошими направленными свойствами, практически равномерными КСВ во всем диапазоне частот и приемлемыми линейными размерами. Однако они требуют согласования входного сопротивления антенны с волновым сопротивлением фидера. Рассчитаем геометрические параметры микрополоскового согласующего устройства (МСУ) КСА с входным сопротивлением $R_{вх}$ = 140 Ом и мощностью излучения P = 50 Вт и коаксиального фидера с волновым сопротивлением W = 50 Ом.

Обозначение геометрических параметров и структура электромагнитного поля несимметричной микрополосковой линии передачи (МЛП) представлены на рис. 1.



Рис. 1. Геометрические параметры и структура поля МЛП

Волновое сопротивление МЛП зависит от отношения параметров b/h с учетом эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{эф}$ [1]:

$$W_{л} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{эф}}} \ln\left(\frac{8h}{b} + 0{,}25\frac{b}{h}\right), \quad \frac{b}{h} < 1; \tag{1}$$

$$W_{л} = 120\frac{\pi}{\sqrt{\varepsilon_{эф}}} \frac{1}{\left(\frac{b}{h} + 1{,}393 + 0{,}667\ln\left(\frac{b}{h} + 1{,}444\right)\right)}, \quad \frac{b}{h} < 1, \tag{2}$$

где

$$\varepsilon_{эф} = \frac{\varepsilon - 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2\sqrt{1 + \frac{10h}{b}}}. \tag{3}$$

В качестве материала для изготовления МЛП удобно взять односторонний фольгированный стеклотекстолит марки СТЭФ. Согласно ГОСТ 12652–74 он выпускается с толщиной диэлектрика 1,5; 2; 3; 4; 5; 10 и далее кратно десяти до 50 мм и диэлектрической проницаемостью ε = 4,5…5,5 на частоте 1 МГц.

В соответствии с методикой для расчета параметров МЛП берется минимальное значение ε [1]. Эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{эф}$ вычисляется по формуле (3). Ее значение меньше ε из-за краевых эффектов электромагнитного поля, присущих несимметричным МЛП (рис. 1), и зависит от ширины полоска *b* – рис. 2.

Для расчета минимально необходимой ширины проводника b_{min} определим силу тока в нем:

$$I = \sqrt{\frac{2P}{R_{вх}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{140}} = 0{,}845 \text{ А}.$$

С учетом запаса прочности целесообразно принять b_{min} = 1 мм [2]. Подставив это значение в формулу (1), получим, что для $W_л = R_{вх}$ =140 Ом толщина диэлектрика будет *h* = 7 мм. Тогда по формуле (2) для $W_л = W$ = 50 Ом при заданной толщине диэлектрика получим ширину полоска b_{max} = 13 мм. Длина МСУ должна быть кратна $\lambda_{ср}/4$ [1]. Получить *h* = 7 мм можно путем склеивания эпоксидной смолой СТЭФ толщиной 3 и 4 мм со стороны открытого диэлектрика. Конструктивно МСУ целесообразно вписать в диаметр отражателя КСА с учетом кратности $\lambda_{ср}/4$. При этом получится минимальный угол схождения ширины полоска МСУ и наилучшие условия согласования.

Расчеты и построение графика выполнены в Mahtcad-15.

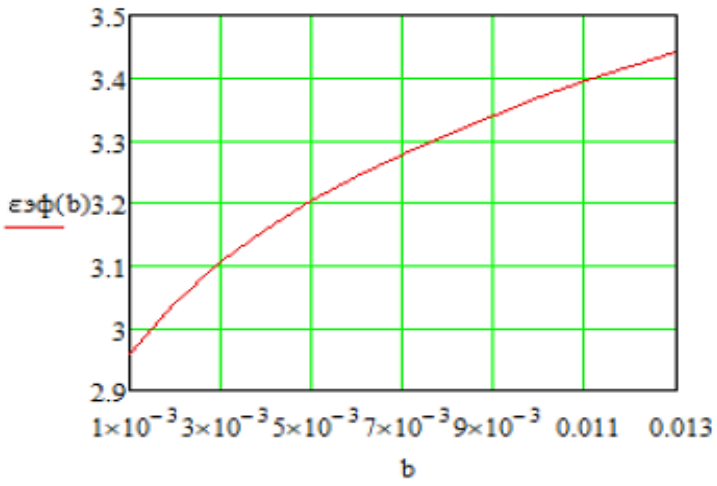


Рис. 2. Эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{эф}$

Библиографический список

1. Дмитриенко, Г. В. Проектирование полосковых устройств СВЧ : учебное пособие / Г. В. Дмитриенко. – Ульяновск : Изд-во ФГБОУ ВО «УлГТУ», 2001. – 112 с.

2. Пудовкин, А. П. Конструирование РЭС : учебное пособие / А. П. Пудовкин, Н. А. Малков, Н. А. Кольтюков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2007. – 54 с.

ОЦЕНКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОЙ ОШИБКИ В НАВИГАЦИОННОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЕ АППАРАТУРЫ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ГНСС

А. А. Иванов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: andreyivanov6898@yandex.ru)

Для определения псевдодальности в аппаратуре приема (АП) сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) используется следящая система за дальностью корреляционного типа. Цифровая обработка сигналов и определение псевдодальности осуществляется в навигационном вычислителе. При малом отношении сигнал–шум на входе АП на выходе дискриминатора в режиме слежения могут возникать аномальные ошибки [1]. В статье [2] были получены алгоритмы обработки информации на выходе следящей системы за дальностью, позволяющие оценить величину аномальной ошибки.

Одной из основных характеристик разработанного алгоритма является время вычислений, затрачиваемое на обработку информации – вычисление оценки вектора состояния и апостериорной вероятности дискретного параметра. Оно не должно превышать длительности шага обработки равного времени T = 0,02 с. Время вычислений определяется быстродействием микропроцессора в навигационном вычислителе и общим числом операций для реализации разработанных алгоритмов. Более точная оценка требует для микропроцессора, установленного в навигационном вычислителе знания: тактовой частоты; разрядности шины данных; архитектуры микропроцессора; системы команд микропроцессора. Однако при сравнении различных способов организации вычислительного процесса первым и достаточно хорошим приближением для времени вычислений может служить требуемое число операций умножения и сложения. Расчеты количества операций умножения и сложения за один такт обработки информации по разработанным алгоритмам были выполнены в предположении, что обращение матриц выполняется по стандартному алгоритму Гаусса, требующему для своей реализации s^3 операций умножения и сложения, где $s \times s$ размерность обращаемой матрицы. При расчетах полагалось, что вектор состояния имеет размер 2×1, а вектор наблюдения размер 1×1, т.е. является скаляром. В результате получили: число операций сложения $A(2,1,N_\theta) = 32 \times (2N_\theta + 1) + 32$; число операций умножения $M(2,1,N_\theta) = 58 \times (2N_\theta + 1) + 49$.

В таблице 1 приведены микропроцессоры, используемые в навигационных вычислителях АП сигналов ГНСС, их тактовая частота и количество тактов за интервал времени T = 0,02 с.

1. Микропроцессор и его тактовая частота

Микропроцессор	Media Tek MT3333	К1917ВА014	Teseo III (Teseo-LIV3R)
Тактовая частота	158 МГц	120 МГц	196 МГц
Число тактов T = 0,02 с	3 160 000	2 400 000	3 920 000

Количество тактов, необходимых для выполнения команд умножения и сложения, зависит от архитектуры процессора, типа данных формата представления чисел и других факторов. Для целочисленных операций сложение может выполняться за 1 такт. Для чисел с плавающей запятой, например, 64-разрядного формата, за 2 – 4 такта. Целочисленное умножение требует больше тактов и может варьироваться от 1 – 7 тактов, а для операций с плавающей запятой от 2 – 5 тактов.

Для расчета количества тактов, необходимых для реализации разработанных алгоритмов, брался наихудший случай: для реализации команды сложения – 4 такта, а команды умножения – 7 тактов.

В таблице 2 приведено количество тактов, необходимых для реализации алгоритмов, в зависимости от числа цифровых фильтров N_θ, используемых для определения аномальной ошибки.

2. Число тактов для реализации разработанных алгоритмов

Количество фильтров, N_θ	7	14	28	56
Число тактов	8481	15 957	30 909	60 813

Из полученных расчетов видно, количество тактов 60813 составляет 2,53% от количества тактов микропроцессора К1917ВА014, у которого минимальная тактовая частота, при этом время, необходимое в нем для обработки разработанных алгоритмов, составит приблизительно 507 мкс, что 39,5 раза меньше шага обработки.

Библиографический список

1. Adaptive Algorithms for Information Processing in Navigation Complexes of Mobile Ground Objects / A. V. Ivanov, V. Yu. Shishkin, D. V. Boikov, et al. // Journal of Communications Technology and Electronics – 2021. – No. 8(66). – P. 926 – 937.

2. Определение аномальных измерений псевдодальности до навигационного космического аппарата в аппаратуре приема сигналов спутниковой радионавигационной системы / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, А. А Иванов, Н. А. Лежнева / Радиотехника и электроника – 2024. – № 8(69). – С. 727 – 740.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИТАЙСКОГО ОПЫТА ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ СВЯЗИ В РОССИИ

В. Д. Кипаренко

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: kiparenko.vd@dvfu.ru)

Модернизация систем мониторинга телекоммуникационной инфраструктуры становится для России практической задачей: растет сетевая нагрузка, стареет оборудование, требуются импортозамещающие решения. Китай за последние годы создал государственную систему мониторинга, ориентированную не на фиксацию уже случившихся отказов, а на их предупреждение. Отдельные элементы китайской системы представляются заслуживающими адаптации к российским условиям.

В КНР телеметрия включается в проекты строительства и модернизации узлов связи на этапе проектирования – не только для центров обработки данных, но и для базовых станций, линейно-кабельных сооружений, опорных сетей. Вместо выборочных проверок, инженерными бригадами применяется непрерывный сбор параметров с датчиков, установленных в каждой критической точке. Данные агрегируются на единых аналитических платформах, где алгоритмы распознают ранние признаки сбоев. Плотность размещения сенсоров на китайских объектах связи, как отмечается в отраслевых обзорах, сопоставима с решениями для гидротехнических сооружений [1].

Отдельного внимания заслуживают интеллектуальные базовые станции. Компания «Huawei» совместно с операторами разработала систему, в которой антенные блоки оснащены следящими устройствами. Они в реальном времени отслеживают перемещение абонентов и характер трафика, автоматически корректируя диаграмму направленности луча. Это позволяет перераспределять емкость сети по фактической нагрузке, а не по статическим картам покрытия. В открытых источниках выделяют три ключевых компонента таких решений: визуализация топологии сети, получение рабочих параметров без остановки обслуживания и многомерная регулировка луча.

Российская практика мониторинга сегодня складывается из двух составляющих. Государственная информационная система Роскомнадзора отслеживает выполнение операторами обязательных требований при оказании услуг. Независимо от этого работают коммерческие платформы, например, «Пульт» (контроль качества каналов на 363 объектах), а также «Сфера» и wiSLA, использующие машинное обучение для поиска корневых причин отказов. Однако в России отсутствует нормативное требование оснащать все вновь строящиеся объекты связи датчиками мониторинга на этапе проектирования. Системы контроля устанавливаются постфактум, что снижает их диагностическую ценность и не позволяет построить достоверные цифровые двойники. Именно здесь китайский опыт может оказаться наиболее полезным. Внедрение государственных стандартов, обязывающих проектировщиков закладывать

телеметрию в проекты связи, позволило бы перейти от эпизодических проверок аварийно-восстановительными бригадами к постоянному сбору данных. Второе направление – адаптация алгоритмов управления антеннами. Российские операторы, особенно в крупных городах и вдоль транспортных коридоров, сталкиваются с неравномерной загрузкой радиосети: часть базовых станций перегружена, другие работают вполсилы, при этом оптическая инфраструктура имеет резервы пропускной способности. Внедрение интеллектуальной регулировки луча, подобной китайской, позволило бы сгладить эти диспропорции без массовой замены оборудования. Таким образом, для России наиболее обоснованным представляется выборочное заимствование стандартизации требований к телеметрии на этапе проектирования и интеллектуальных алгоритмов перераспределения нагрузки в радиосетях [2].

Библиографический список

1. China Compulsory Certification (CCC) Guidelines [Электронный ресурс]. – URL : https://www.eusmecentre.org.cn/sites/default/files/files/201217-Guidelines on CCC (Alessio Petino Betty Xu)(1).pdf.(дата обращения: 06.05.2026).

2. China Telecom, China Unicom, ZTE unveil digital twin-based network assurance [Электронный ресурс]. – URL : https://www.computerweekly.com/news/366560734/China-Telecom-China-Unicom-ZTE-unveil-digital-twin-based-network-assurance.(дата обращения: 06.05.2026).

КВЧ-АНТЕННА С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ЗЕРКАЛОМ

В. В. Ковалевская, В. В. Негробов

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
(e-mail: rt.kaf@cchgeu.ru)

Известны конструкции зеркальных антенн с плоскими рефлекторами, эффективно преобразующими сферическую волну облучателя в плоскую. Фазовая коррекция оптического пути при этом реализуется микрополосковыми элементами на подложке, канавками или короткозамкнутыми отверстиями в экране [1, 2], а также вынесенными отражателями различной высоты. Если синтез зеркал первого типа требует достаточно строгого электродинамического моделирования, то рефлекторы второго/третьего типов в первом приближении рассчитываются методами геометрической оптики.

На рисунке 1 представлена схема антенны с профилированным зеркалом, выполненным в виде системы периодических канавок переменной глубины в проводящем основании. Шаг следования канавок, как правило, меньше длины волны излучения ($d < \lambda$). Глубина канавок компенсирует разность хода лучей: для вертикальных лучей коррекция пути минимальна, а для центральных зон зеркала она обеспечивается увеличением глубины канавок. Огибающая профиля зеркала соответствует классическому параболическому профилю.

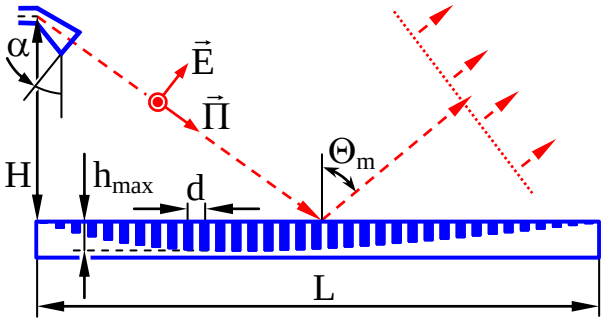


Рис. 1. Схема антенны

Моделирование зеркальной антенны с плоским зеркалом выполнено по методике, изложенной в [3, 4]. Диаграмма направленности (ДН) в Е-плоскости и вторичные параметры антенны получены при решении сформированной системы уравнений для комплексных амплитуд волноводных мод в канавках при условии возбуждения зеркала Е-секториальным рупором. На основе квазиточных соотношений разработана программа в среде MatLab, которая по заданным параметрам антенны (λ, углу фазирования Θ_m, высоте расположения облучателя H, шаге d и ширине канавок) автоматически рассчитывает глубинный профиль рефлектора, коэффициенты связи и возбуждения канавок. Программа формирует систему уравнений и вычисляет на основе найденных параметров волноводных мод ДН антенны и ее вторичные показатели [5].

Численные эксперименты, в частности, показали, что при высоте подвеса облучателя $H = 10\lambda$ и угле фазирования $\Theta_m = 45°$ оптимальная апертура зеркала составляет $L = 28\lambda$. При шаге $d = 0{,}4\lambda$ максимальная глубина канавок h_{max} не превышает $0{,}7\lambda$, а оптимальная ширина составляет $¾ \cdot d$ [6]. Для достижения высокого коэффициента полезного действия (КПД), сниженного уровня боковых лепестков и максимальной направленности размер раскрыва рупора и угол его наклона α должны равняться $1{,}25\lambda$ и 45°. Итоговый расчет подтвердил, что антенна формирует в Е-плоскости ДН с главным лепестком, ориентированным под углом 45°, шириной 3° при КПД более 95%, уровне боковых лепестков менее «минус» 20 дБ и отклонении парциального коэффициента направленного действия не более 1 дБ.

Профилирование рефлектора позволяет сократить габариты системы. В отличие от гладких зеркал, где уменьшение расстояния до облучателя ведет к росту глубины профиля, канавочная структура минимизирует высоту за счет периодичности входного импеданса канавок и возможности их заполнения диэлектриком. Технология профилирования упрощает реализацию перепадов глубины и обеспечивает формирование ДН специальной формы (косекансной, секторной, многолучевой) без существенных технологических затрат.

Библиографический список

1. Зеркальная СВЧ-антенна с плоским дифракционным рефлектором для систем телекоммуникаций и спутникового телевидения / К. Б. Меркулов, А. В. Останков, Ю. Г. Пастернак и др. // Телекоммуникации. – 2002. – № 11. – С. 25 – 29.

2. Антенна трехсантиметрового диапазона волн с плоским фокусирующим рефлектором / К. Б. Меркулов, А. В. Останков, Ю. Г. Пастернак и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – Т. 46, № 4. – С. 165–166.

3. Останков, А. В. Вычислительная модель для исследования поля дифракции канавки в экране / А. В. Останков // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – № 11-12. – С. 3 – 11.

4. Останков, А. В. Математическое моделирование электродинамических процессов в зеркальной антенне с плоским рефлектором и проблемы его реализации / А. В. Останков, В. И. Юдин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 6. – С. 86 – 88.

5. Digital simulation of electromagnetic wave diffraction by a rectangular groove in a conducting screen / A. Ostankov, A. Rud, A. Salnikova, et al. // AIP conference proceedings : Proc. 4th int. conf. on modernization, innovations, progress: Engineering-IV. – 2022. – Melville : AIP Publ., 2024. – P. 060024.

6. Останков, А. В. Оптимизация свойств вынесенного облучателя в антенне с плоским гребенчатым зеркалом / А. В. Останков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 5-1. – С. 25 – 27.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА МЕТАСТРУКТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ МЕТАМАТЕРИАЛЬНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ

Я. Р. Котенко, Т. Ш. Шералиев

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: kotenko.yr@dvfu.ru; Sheraliev.ts@dvfu.ru)

Рост использования гигагерцового диапазона в связи, радиолокации и IoT делает актуальной задачу эффективного поглощения СВЧ-волн для подавления помех, защиты электроники и обеспечения электромагнитной совместимости. Поглотители на традиционных материалах часто ограничены по полосе частот, толщине или массе. Поэтому особую ценность приобретают новые решения, в частности на основе метаматериалов, позволяющих создавать компактные и высокоэффективные поглотители гигагерцового излучения.

Для исследования была взята ранее спроектированная структура с метаячейкой формы неправильного разделенного кольца, обладающей резонансами коэффициента отражения на частотах 6,3, 9,2 и 12,2 ГГц [1]. На рисунке 1 представлена исследуемая метаячейка.

Материал метаструктуры был заменен на никель и медь с тонким слоем никеля. Выбор обусловлен разными магнитными проницаемости меди и никеля. Относительные магнитные проницаемости: $\mu Ni = 600$, $\mu Cu = 1$.

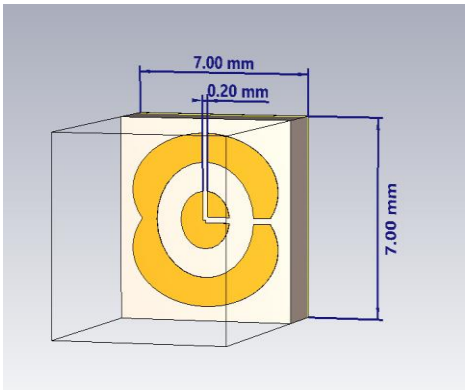


Рис. 1. Метаячейка метаматериального поглотителя, в форме неправильного разделенного кольца

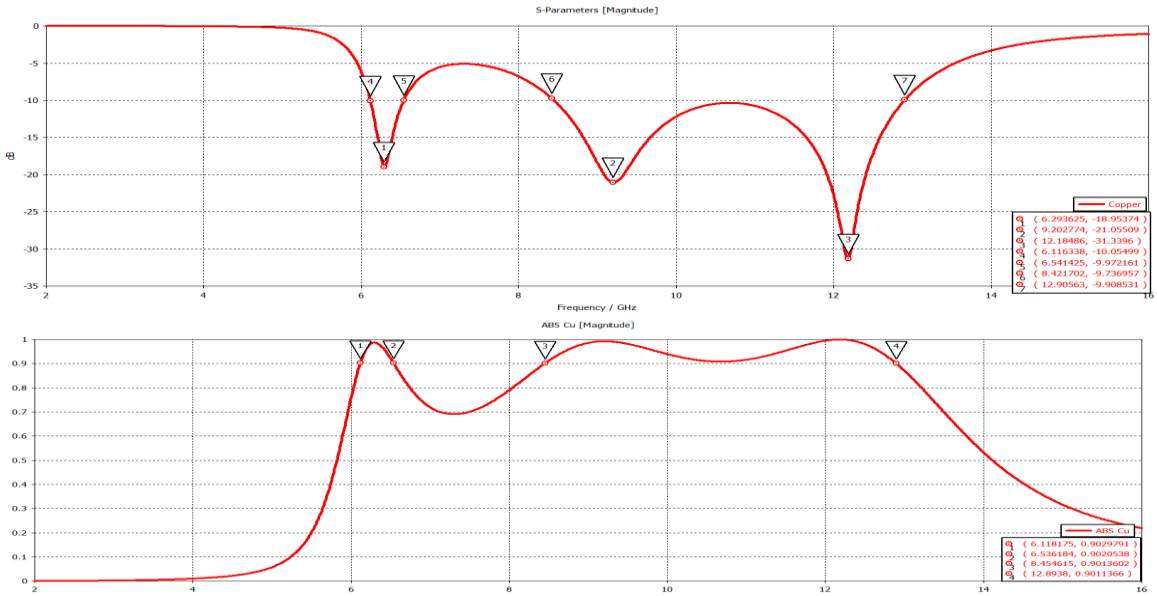


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения (сверху) и коэффициента поглощения (снизу) от частоты

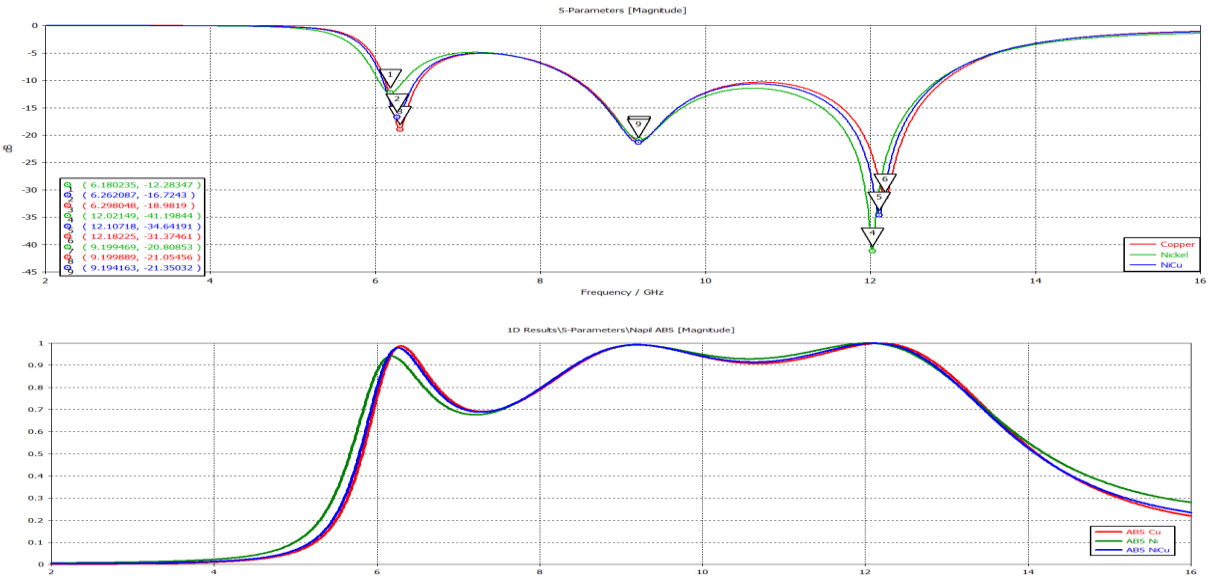


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения и поглощения для меди (красный цвет), никеля (зеленый), меди с тонким слоем никеля (синий)

Увеличение значения относительной магнитной проницаемости материала метаструктуры повлияло на первый и третий резонансы, в области низких частот резонансы ослаблялись, в области высоких – усиливались.

Библиографический список

1. Стаценко, Л. Г. Влияние геометрических параметров метаячеек на свойства поглотителей СВЧ-волн / Л. Г. Стаценко, Я. Р. Котенко, Я. С. Дронин // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 2.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АБОНЕНТА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Н. М. Котиков, Д. С. Горин, Р. Р. Шатовкин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
(e-mail: kotikov@mirea.ru)

Развитие коммуникационных систем и центров обработки данных определяет необходимость перехода от декомпозированного сбора и анализа событий к формированию комплексных моделей субъектов. При анализе активности абонента становится очевидно, что субъект представляет собой активное звено (участника) сложной автоматизированной среды, в рамках которой обеспечивается непрерывное взаимодействие: клиентского устройства, сетевой инфраструктуры оператора, внешней среды и механизмов обеспечения безопасности. Подобная архитектура определяет сложности организации наблюдения за состоянием отдельных клиентов при использовании стандартных сил и средств. Именно поэтому цифровой двойник как модель, позволяющая обеспечить комплексный подход к анализу непрерывного потока данных, представляет особенный интерес.

В историческом понимании цифровой двойник – это виртуальное отображение реального физического объекта или системы, непрерывно связанное двунаправленным потоком данных [1].

В традиционных подходах концепция описывается как часть архитектуры, объединяющей параметры объекта, процессы обмена информацией и механизмы синхронизации состояния среды [2].

Интерпретация концепции при использовании технологий мобильной связи показывает, что цифровой двойник абонента может рассматриваться как динамическая информационная модель, отражающая текущий статус устройства, конфигурацию, профиль поведения и уровень защищенности от цифровых угроз в реальном времени.

Архитектуру цифрового двойника абонента мобильной связи можно описать как совокупность модулей, направленных на формирование профиля текущего состояния, анализ поведения собеседника, идентификацию скрытых

аномалий и поддержку защитных действий. Сведения из модели состояния наиболее эффективно могут быть представлены в виде графа. В такой структуре само устройство, базовые станции, внешние узлы и запрашиваемые сервисы выступают в роли элементов единой сети, а связи между ними отражают все необходимые логические параметры: зависимость, частоту контактов или объем данных.

Модуль поведенческого анализа цифрового двойника позволяет оценить, насколько текущие действия абонента соответствуют нормальному профилю поведения. Для этого необходимо учесть, в какое время устройство обычно проявляет сетевую активность, какие географические маршруты являются типичными и какие виды трафика считаются для него естественными. По результатам формирования устойчивого базиса становятся отчетливо заметны нехарактерные отклонения, указывающие на потенциальную угрозу: резкая смена локации или генерация нетипичного сигнального трафика.

Существенное преимущество цифрового двойника заключается в способности коррелировать разрозненные сетевые события в единую логическую цепочку. Обычная система мониторинга позволяет зафиксировать кратковременную потерю сигнала или отправку служебного сообщения, что само по себе редко расценивается как инцидент.

Цифровой двойник позволяет рассматривать подобные артефакты исключительно в контексте других происходящих в системе событий. За счет корреляции множества метрик многократно повышается вероятность раннего обнаружения и снижается зависимость от реагирования на простые пороговые значения.

В процессе защиты абонента мобильной связи от внешнего деструктивного воздействия цифровой двойник выполняет несколько критических функций: непрерывно фиксирует штатное взаимодействие устройства с сетью, выявляет подозрительные отклонения, оценивает вероятность возможного нелегитимного воздействия и формирует данные для блокировки. Актуальные руководства по информационной безопасности подчеркивают необходимость сочетания методов предотвращения, обнаружения и реагирования на инциденты (prevention, detection and response) [3]. Цифровой двойник органично вписывается в эту концепцию, поскольку позволяет рассматривать атаку не как изолированный инцидент, а как процесс, затрагивающий различные атрибуты соединения и абонента.

Таким образом, цифровой двойник абонента мобильной связи следует рассматривать как информационную модель, синхронизируемую в реальном времени, а также отражающую статус, структуру коммуникаций, поведение и уровень защищенности. Главная ценность заключается в возможности коррелировать события между собой, выявляя аномалии и прогнозируя реакцию устройства на нелегитимные воздействия. Ключевое отличие такого подхода от традиционного сетевого мониторинга состоит в переходе от наблюдения за инфраструктурой к целостному анализу безопасности отдельного субъекта.

Библиографический список

1. Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers. – Cham : Springer, 2017. – P. 85 – 113.
2. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : Краткий доклад / А. И. Боровков и др. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – 62 с.
3. NIST Special Publication 800-61 Rev. 2. Computer Security Incident Handling Guide. – National Institute of Standards and Technology, 2012.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Д. А. Кульков, Д. С. Горин, Р. Р. Шатовкин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
(e-mail: kulkov@mirea.ru)

При рассмотрении современной операционной системы (ОС) становится очевидно, что она уже не может восприниматься только как набор программных компонентов, обеспечивающих запуск приложений и распределение ресурсов. Она представляет собой сложную среду, в которой одновременно взаимодействуют пользовательские процессы, системные службы, драйверы, сетевые соединения, механизмы контроля доступа и средства информационной безопасности. Такая сложность делает затруднительным простое наблюдение за состоянием ОС с помощью отдельных журналов или показателей производительности. Поэтому особый интерес представляет цифровой двойник ОС как модель, позволяющая увидеть ее состояние и поведение в более целостном виде.

В общем понимании цифровой двойник представляет собой виртуальное отображение реального объекта или системы, связанное с ним потоками данных и используемое для анализа, моделирования и поддержки принятия решений [1]. В стандартизованном подходе цифровой двойник рассматривается как часть архитектуры, включающей описание объекта, обмен данными и механизмы синхронизации между реальной и виртуальной средой [2]. Если перенести эту идею на ОС, то цифровой двойник можно рассматривать как динамическую информационную модель, отражающую состояние, конфигурацию, поведение и уровень защищенности ОС.

В современных подходах к наблюдаемости программных систем обычно выделяются метрики, журналы и трассировки [3]. Метрики позволяют оценить загрузку процессора, использование оперативной памяти, активность дисковой подсистемы и сетевую нагрузку. Журналы фиксируют ошибки, предупреждения, запуск служб, попытки входа в систему и изменение параметров безопас-

ности. Трассировки дают возможность восстановить последовательность действий между процессами и понять, как одно событие влияет на другие элементы системы.

Функциональный состав цифрового двойника ОС можно описать как совокупность взаимосвязанных возможностей, направленных на построение модели состояния, анализа поведения, выявление отклонений, визуализацию и поддержку защитных действий. Сведения из модели текущего состояния могут быть представлены в виде графа, где процесс, файл, пользователь, сетевое соединение или устройство выступают в роли единой структуры, а связи между ними отражают доступ, владение, взаимодействие или зависимость.

Поведенческая часть цифрового двойника позволяет оценивать, насколько текущее состояние ОС соответствует нормальному режиму работы. Для этого учитывается, какие процессы обычно активны, какие сетевые соединения являются типичными, какие диапазоны нагрузки считаются допустимыми и какие изменения конфигурации происходят в штатных условиях. На этом фоне становятся заметными отклонения, которые могут указывать на заражение вредоносным программным обеспечением.

Существенное преимущество цифрового двойника заключается в способности связывать отдельные события в единую картину. Обычная система мониторинга может показать рост нагрузки на процессор или увеличение сетевой активности, но такие признаки сами по себе не всегда означают угрозу. Цифровой двойник позволяет рассматривать их в контексте других событий. За счет корреляции событий повышается вероятность раннего обнаружения угрозы и уменьшается зависимость от простых пороговых правил.

В защите от вредоносного программного обеспечения цифровой двойник может выполнять несколько важных функций. Он способен фиксировать нормальное состояние ОС, выявлять отклонения, помогать определять масштаб заражения, оценивать последствия действий вредоносного кода и формировать рекомендации по локализации угрозы. Руководства по противодействию вредоносному программному обеспечению подчеркивают необходимость сочетания профилактики, обнаружения, реагирования и восстановления после инцидента [4]. Цифровой двойник хорошо вписывается в эту логику, поскольку объединяет данные о системе и позволяет рассматривать инцидент не как отдельное событие, а как процесс, затрагивающий разные компоненты ОС.

Таким образом, цифровой двойник ОС можно рассматривать как синхронизируемую информационную модель, отражающую состояние, структуру, поведение и защищенность ОС. Его ценность заключается не только в фиксации отдельных параметров, но и в способности связывать события, выявлять аномалии, прогнозировать развитие сбоев и помогать защите от вредоносного программного обеспечения. Главное отличие такого подхода от традиционного мониторинга состоит в переходе от разрозненного наблюдения к целостному анализу.

Библиографический список

1. Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Cham : Springer, 2017. – P. 85 – 113.
2. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. – Geneva : International Organization for Standardization, 2021. – 12 p.
3. OpenTelemetry Authors. Signals // OpenTelemetry Documentation. – URL : https://opentelemetry.io/docs/concepts/signals/ (дата обращения: 29.04.2026).
4. Souppaya, M. Guide to Malware Incident Prevention and Handling for Desktops and Laptops: NIST Special Publication 800-83 Revision 1 / M. Souppaya, K. Scarfone. – Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. – 51 p.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ РАДИОВЫСОТОМЕРА

Н. А. Лежнева

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: nataliya.lezhneva@wunder.haus)

Введение. Для обеспечения захода на посадку и посадки летающие беспилотные транспортные средства (БТС) и летательные аппараты (ЛА) должны оснащаться информационно-измерительными системами, которые обеспечивали бы решение данных задач. Обычно в состав систем включают аппаратуру приема (АП) сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), радиовысотомер (РВ), инерциальную навигационную систему (ИНС) и барометрический высотомер (БВ) [1]. АП сигналов ГНСС, как правило, является совмещенной, многоканальной, позволяет принимать сигналы ГНСС ГЛОНАСС, NAVSTAR (GPS), Галилео (Galileo), Бэйдоу (BeiDou) и обеспечивает высокую точность определения координат местоположения и параметров движения БТС и ЛА. Основным недостатком АП сигналов ГНСС является кратковременное пропадание сигналов на выходе или появление аномальных измерений [2]. В этом случае информационно-измерительная система не использует выходные данные с АП сигналов ГНСС и переходит в режим работы, при котором основным радиотехническим датчиком становится радиовысотомер.

В работе была проведена постановка задачи для синтеза алгоритмов обработки информации в информационно-измерительной системе в составе РВ, ИНС и БВ в целях оценивания высоты полета и вертикальной скорости. Методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов [1 – 4] синтезированы оптимальные алгоритмы обработки информации.

На основе полученных алгоритмов была разработана структурная схема обработки информации. Схема представлена на рис. 1. В состав структурной схемы обработки информации входят сумматоры, усилители и линии задержки. В дискретные моменты времени t_{k+1} на схему обработки поступают измеренные значения: высоты $H^{РВ}(t_{k+1})$ от ГНСС; высоты $H^{БВ}_{ОТН}(t_{k+1})$ от БВ и вертикального ускорения $a_Z^{ИНС}(t_{k+1})$ от ИНС. Предполагается, что преобразование информации в цифру выполняется в самих измерителях. На выходе схемы обработки вектор состояния $\mathbf{X}^{\bullet}(t_{k+1})$ включает оптимальные оценки высоты и вертикальной скорости.

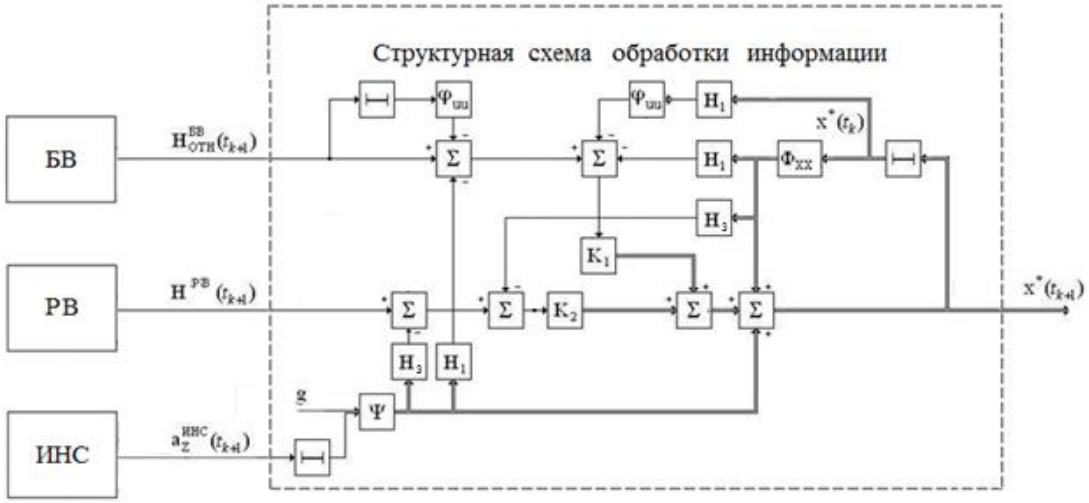


Рис. 1. Структурная схема обработки сигналов РВ, ИНС и БВ

Проведена оценка потенциальных характеристик точности оценивания высоты и вертикальной скорости в разработанной информационно-измерительной (навигационной системе). В результате расчетов было получено, что стационарное значение апостериорной среднеквадратической ошибки оценивания высоты составляет 0,0273 м при времени переходного процесса порядка 40 с, а стационарное значение апостериорной среднеквадратической ошибки оценивания вертикальной скорости составляет 0,0025 м/с при времени переходного процесса порядка 15 с.

Библиографический список

1. Иванов, А. В. Автономные системы контроля целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов // Радиотехника. – 2014. – № 7. – С. 55 – 64.

2. Adaptive Algorithms for Information Processing in Navigation Complexes of Mobile Ground Objects / A. V. Ivanov, V. Yu. Shishkin, D. V. Boikov, et al. // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2021. – No. 8(66). – P. 926 – 937.

3. Определение аномальных измерений псевдодальности до навигационного космического аппарата в аппаратуре приема сигналов спутниковой

радионавигационной системы / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, А. А Иванов, Н. А. Лежнева // Радиотехника и электроника – 2024. – № 8 (69). – С. 727 – 740.

4. Определение аномальных измерений псевдодальности до навигационного космического аппарата в аппаратуре приема сигналов спутниковой радионавигационной системы / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, А. А. Иванов, Н. А. Лежнева // Радиотехника и электроника. – 2024. – № 8(69). – С. 727 – 740.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ТЕПЛА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Н. А. Логвинов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: logvinov_kolya1@mail.ru)

В современной промышленности при производстве антифрикционных изделий широкое применение находят двухслойные материалы, состоящие из бронзового основания и приработочного фторопластового слоя. Одной из наиболее эффективных методик для решения данной задачи является тепловой метод, позволяющий проводить измерения в динамическом режиме на движущейся ленте.

Один из подходов к решению этой задачи описан в патенте RU 2313065 C1: на поверхность движущейся ленты воздействуют точечным источником тепловой энергии мощностью q, а термоприемником измеряют избыточную температуру $T(x)$ в точке на расстоянии x за источником по линии его движения. Среднеинтегральная теплопроводность λ тепловой системы при этом определяется как [1]

$$\lambda = \frac{q}{2\pi T(x)x}. \quad (1)$$

Ступенчато изменяя мощность источника и отслеживая изменение λ от глубины прогрева, определяют теплопроводность и толщину приработочного слоя.

Однако фторопласт обладает чрезвычайно гладкой поверхностью и низкой степенью черноты, из-за чего заметная доля теплового излучения источника отражается от нее обратно в окружающую среду. Формула (1) выведена для полубесконечного тела в предположении об отсутствии теплообмена с внешней средой, поэтому подстановка в нее полной мощности источника q вместо реально поглощенной мощности ведет к систематической погрешности при определении толщины слоя. Оценить и скомпенсировать эти потери в рамках одноточечной схемы измерения невозможно.

Для устранения данной погрешности предлагается дополнить схему контроля вторым термоприемником, расположенным с поперечным смещением y от линии движения источника. Принцип одновременного использования двух

термоприемников для восстановления параметров температурного поля движущегося источника обоснован в патенте RU 2182310 C1. Распределение избыточной температуры в произвольной точке поверхности при скорости движения источника H описывается соотношением [2]

$$T(x, y) = \frac{q}{2\pi\lambda\sqrt{x^2 + y^2}} \exp\left[-\frac{\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right)H}{2a} \right], \quad (2)$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние от центра пятна нагрева до точки измерения, м; a – коэффициент температуропроводности системы, м²/с.

Одновременное измерение $T(x, 0)$ первым термоприемником и $T(x, y)$ вторым дает систему двух уравнений вида (2) с тремя неизвестными: q, λ и a. Для замыкания системы берется отношение двух уравнений, в котором q и λ сокращаются, и коэффициент температуропроводности a определяется как

$$a = \frac{(R - x)H}{2\ln\left(\frac{T(x, 0)\,x}{T(x, y)\,R}\right)}, \quad (3)$$

где все обозначения соответствуют формуле (2).

Затем находится теплопроводность через связь теплопроводности, температуропроводности и объемной темплоемкости. Поскольку теплоемкость системы «пористый бронзовый каркас–фторопласт» заранее неизвестна, она рассчитывается через правило смешения с учетом пористости П бронзового каркаса, определенной по методу [1]

$$(c\rho)\text{сис} = \text{П}\cdot(c\rho)\text{фтор} + (1 - \text{П})\,(c\rho)\text{бронза}, \quad (4)$$

где $(c\rho)$фтор и $(c\rho)$бронза – справочные значения объемной теплоемкости фторопласта и бронзы соответственно; П – пористость каркаса.

После нахождения λ из уравнения (2) определяется эффективная поглощенная мощность q^*, которая подставляется в формулу (1) вместо номинальной мощности источника q, что исключает систематическую погрешность, вносимую отражением от поверхности фторопласта.

Практическая реализация усовершенствованного метода позволяет значительно повысить достоверность контроля толщины. Объединение классической тепловой толщинометрии с анализом поперечного распределения температур обеспечивает точность измерений, не доступную при использовании стандартных одноточечных схем. Это гарантирует стабильность характеристик и снижает риск появления брака, вызванного неверной интерпретацией тепловых данных из-за гладкости контролируемых изделий.

Библиографический список

1. Пат. № 2313065 C1 Российская Федерация, МПК G01B 7/06, G01N 25/00. Способ непрерывного контроля толщины слоев четырехслойного металлофторопластового ленточного материала, пористости его металлического кар-

каса и концентрации входящих в четвертый слой компонент / Банников А. Н., Пудовкин А. П., Чернышова Т. И. ; № 2006117923/28 ; заяв. 24.05.2006 ; опубл. 20.12.2007.

2. Пат. № 2182310 C1 Российская Федерация, МПК G01B 7/06. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины и теплофизических свойств изделий / Плужников Ю. В., Колмаков А. В., Пудовкин А. П. ; № 2001100142/28 ; заяв. 03.01.2001 ; опубл. 10.05.2002.

МЕТОДЫ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА В НАЗЕМНОЙ РЛС

И. С. Медведев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: vanyusha.medvedev.003@mail.ru)

В адаптивных фильтрах априорная неопределенность статистических характеристик сигналов и помех преодолевается оцениванием их в процессе работы фильтра и использованием полученной информации для оптимизации фильтра. Задачей является выбор для случая синтеза канала слежения ИИС компонент вектора состояния, вектора наблюдения и параметров, подлежащих идентификации.

Существуют методы адаптивной фильтрации для оценки фазовых координат дальномерного канала:

1. Метод уточнения ковариации по обновляющему процессу. Данный подход основан на идее, что ковариационную матрицу шума наблюдений возможно вычислить по ковариационной матрице невязок [1, 2]:

$$\boldsymbol{R}_{\text{о}}(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=i_0}^{k}\Delta\boldsymbol{z}(k)\Delta\boldsymbol{z}^{\text{т}}(k) - \boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{\text{э}}(k)\boldsymbol{H}^{\text{т}}; \quad (1)$$

$$\Delta\boldsymbol{z}(k) = \boldsymbol{z}_{\text{и}}(k) - \boldsymbol{z}_{\text{э}}(k), \quad (2)$$

где N – количество тактов усреднения в скользящем окне для формирования достаточной статистики; $i_0 = k - N + 1$ – начальное положение скользящего окна; $P_{\text{э}}(k)$ – предсказанное значение ковариационной матрицы ошибки вектора состояния; $\Delta\boldsymbol{z}(k)$ – невязка измерений; $\boldsymbol{z}_{\text{э}}(k)$ – прогнозируемые значения измерений.

Этот метод реализации адаптивного фильтра улучшает точностные характеристики при условии, если изменяется ковариация невязки шума наблюдения, а не шума вектора состояния или изменения модели динамической системы (маневрирование ВС). Этот метод не учитывает маневры ВС.

2. Адаптивный алгоритм с плавной подстройкой. Данный метод предназначен для адаптации к изменениям модели системы. В случае возрастания

ковариации невязки наблюдений медленно повышается ковариационная матрица вектора состояния [1, 2]

$$\boldsymbol{P}_{э}(k) = \boldsymbol{\lambda}(k)\boldsymbol{\Phi}(k)\boldsymbol{P}_{о}(k-1)\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(k) + \boldsymbol{Q}_{x}(k), \quad (3)$$

где $\lambda(k)$ – весовой коэффициент, который рассчитывается по формуле [2 – 4]

$$\boldsymbol{\lambda}(k) = \max\left\{1, \frac{tr\left[\boldsymbol{C}_0(k) - \boldsymbol{R}(k) - \boldsymbol{H}\boldsymbol{Q}_x(k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\right]}{tr\left[\boldsymbol{H}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{P}_{о}(k)\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right]}\right\}; \quad (4)$$

$$\boldsymbol{C}_0(k) = \frac{\boldsymbol{\lambda}(k-1)\Delta\boldsymbol{z}(k-1)\Delta\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}(k-1)}{1+\boldsymbol{\lambda}(k-1)}, \quad (5)$$

где $tr[\cdot]$ – операция нахождения следа матрицы.

Данный метод позволяет отслеживать изменения ковариационной матрицы состояния.

3. Гибридный алгоритм. Этот алгоритм основан на использовании метода уточнения ковариации по обновляющему процессу и метода уточнения ковариации по обновляющему процессу, который позволяет одновременно проводить адаптацию к изменению ковариации шума наблюдений и изменению динамической системы. Это возможно за счет параллельного анализа обновляющей последовательности первого метода и регулировки ковариационной матрицы ошибки вектора состояний второго метода [1, 2]:

$$\boldsymbol{R}_{о}(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=i_0}^{k}\Delta\boldsymbol{z}(k)\Delta\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}(k) - \boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{эо}(k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}; \quad (6)$$

$$\boldsymbol{P}_{эо}(k) = \boldsymbol{\lambda}(k)\boldsymbol{\Phi}(k)\boldsymbol{P}_{о}(k-1)\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(k) + \boldsymbol{Q}_{x}(k); \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\lambda}(k) = \max\left\{1, \frac{tr\left[\boldsymbol{C}_0(k) - \boldsymbol{R}_{о}(k) - \boldsymbol{H}\boldsymbol{Q}_x(k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\right]}{tr\left[\boldsymbol{H}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{P}_{о}(k)\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right]}\right\}; \quad (8)$$

$$\boldsymbol{C}_0(k) = \frac{\boldsymbol{\lambda}(k-1)\Delta\boldsymbol{z}(k-1)\Delta\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}(k-1)}{1+\boldsymbol{\lambda}(k-1)}; \quad (9)$$

$$\boldsymbol{K}_{ф}(k) = \boldsymbol{P}_{э}(k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\left\{\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{эо}(k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_{о}(k)\right\}^{-1}; \quad (10)$$

$$\boldsymbol{P}_{о}(k) = \boldsymbol{P}_{эо}(k) - \boldsymbol{K}_{ф}(k)\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{эо}(k). \quad (11)$$

Таким образом метод уточнения ковариации по обновляющему процессу улучшает точностные характеристики фильтра при условии, если изменяется ковариация невязки шума наблюдения, а метод адаптивнго алгоритма с плавной подстройкой улучшает точностные характеристики фильтра, если изменяются динамические параметры модели системы.

В условиях неопределенности, когда неизвестны изменения шума наблюдения или динамических параметров модели системы, целесообразно использовать гибридный алгоритм.

Библиографический список

1. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 84 с.
2. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
3. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.
4. Концепция построения и структура перспективного информационно-измерительного комплекса / У. Р. Наимов, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 30 – 36.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА С АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ В НАЗЕМНОЙ РЛС

И. С. Медведев, Ю. Н. Панасюк

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: vanyusha.medvedev.003@mail.ru)

В алгоритме дальномерного канала с адаптивной фильтрацией в наземной радиолокационной станции (РЛС) используется трехмерная модель состояния и одномерная модель наблюдения для оценки фазовых координат воздушных судов (ВС) [1 – 3]:

$$\left.\begin{aligned} &Д(k) = Д(k-1) + V(k-1)T + 0{,}5a(k-1)T^2; \\ &V(k) = V(k-1) + a(k-1)T; \quad a(k) = (1-\alpha_ф T)a(k-1) + \xi_a(k-1); \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

$$Д_и(k) = Д(k) + \xi_Д(k), \qquad (2)$$

где Д, V, a – дальность, скорость, ускорение ВС по линии визирования; $\alpha_ф$ – постоянная времени маневра; $\xi_a(k-1)$ и $\xi_Д(k)$ – гауссовские шумы.

Для повышения точности оценки Д, V, a в алгоритме дальномерного канала используется оценка ковариационной матрицы невязок $R_o(k)$ и ковариационной матрицы вектора состояния $P_{эо}(k)$. Используя модели состояния (1) и модель наблюдения (2), а также с учетом выражений калмановской фильтрации [1, 2, 4], был получен алгоритм фильтрации дальномерного канала в РЛС:

$$
\left.
\begin{aligned}
&Д_{о}(k) = Д_{э}(k) + K_{ф11}(k)\Delta Д;\quad V_{о}(k) = V_{э}(k) + K_{ф21}(k)\Delta Д(k);\\
&a_{о}(k) = a_{э}(k) + K_{ф31}(k)\Delta Д;\ \Delta Д(k) = Д_{и}(k) - Д_{э}(k);\\
&Д_{э}(k) = Д_{о}(k-1) + V_{о}(k)T + a_{о}(k)T^{2}/2;\\
&V_{э}(k) = V_{о}(k-1) + a_{о}(k-1)\tau;\quad a_{э}(k) = (1-\alpha_{ф}T)a_{о}(k-1);\\
&R_{о}(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=i_0}^{k}\Delta Д(k)\Delta Д^{т}(k) - HP_{э}(\mathrm{k})H^{т};\\
&P_{эо}(k) = \lambda(k)\Phi(k)P_{о}(k-1)\Phi^{т}(k) + \mathrm{Q}_{x}(k);\\
&\lambda(k) = \max\left\{1, \frac{tr\left[C_{0}(k) - R_{о}(k) - H\mathrm{Q}_{x}(k)(k)H^{т}\right]}{tr\left[H\Phi P_{о}(k)\Phi^{т}H\right]}\right\};\\
&\mathrm{C}_{0}(k) = \frac{\lambda(k-1)\Delta z(k-1)\Delta z^{т}(k-1)}{1+\lambda(k-1)};\\
&K_{ф}(k) = P_{эо}(k)H^{т}\left\{HP_{эо\,э}(k)H^{т}(k) + R_{о}(k)\right\}^{-1};\\
&P_{о}(k) = P_{эо}(k) - K_{ф}(k)HP_{эо}(k).
\end{aligned}
\right\}
\qquad (2)
$$

На основании полученного алгоритма проводилось имитационное моделирование движения ВС относительно РЛС ИИС. Для имитационного моделирования движения ВС использовался маневр ВС «большая коробочка». Имитационное моделирование на ЭВМ представляет собой имитацию входных сигналов $Д_{и}(k)$ (2) и обработку этих сигналов с помощью алгоритма (2). Имитация входного сигнала $Д_{и}(k)$ представляет собой изменение истинной дальности ВС по линии визирования $Д(k)$ и шума наблюдения $\xi_{Д}(k)$.

Результаты моделирования представлены на рис. 1 – графики изменения во времени СКО оценки фильтрации дальности ВС относительно РЛС ИИС для адаптивного фильтра и неадаптивного фильтра.

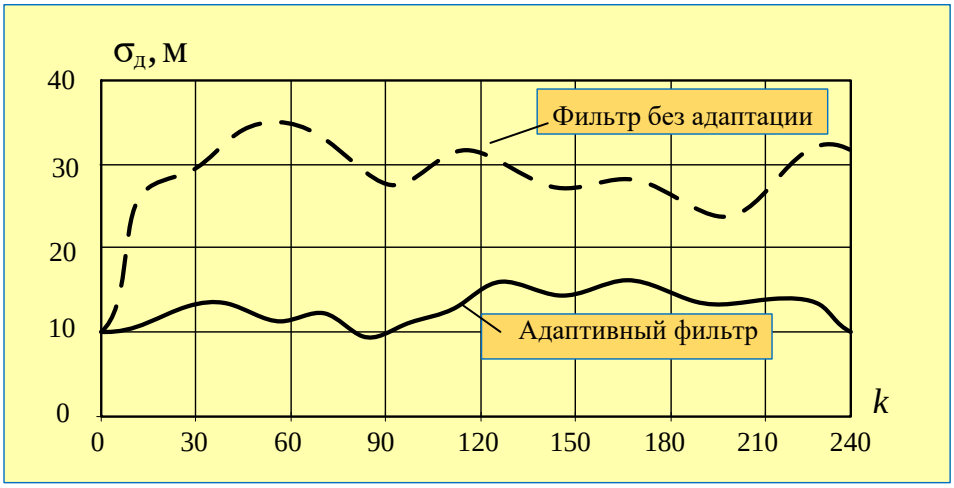


Рис. 1. Зависимость СКО дальности от времени

Таким образом использование алгоритма дальномерного канала с адаптивной фильтрацией позволяет повысить точность оценки дальности по сравнению с фильтром без адаптации.

Библиографический список

1. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

2. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.

3. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.

4. Indication of relative motion intensity of aerodynamic object and meters with different physical nature / S. N. Danilov, S. P. Moskvitin, Yu. N. Panasyuk, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УДАЛЕННОГО СБОРА ДАННЫХ ПРИБОРОВ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ LoRaWAN

Д. Д. Москвитина

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

Модернизация энергетического комплекса Российской Федерации неразрывно связана с цифровизацией распределительных сетей и автоматизацией процессов коммерческого учета. Переход от ручного сбора показаний к интеллектуальным системам учета электрической энергии (ИСУЭ) позволяет минимизировать коммерческие потери, оптимизировать балансы электроэнергии и снизить операционные издержки гарантирующих поставщиков и сетевых организаций. Внедрение подобных систем требует выбора оптимального технологического стека, способного обеспечить высокую дальность передачи данных, помехоустойчивость и экономическую эффективность в условиях плотной городской застройки или значительной удаленности объектов.

Развертывание интеллектуального учета электроэнергии жестко регламентировано государственными стандартами и федеральным законодательством:

- Федеральный закон № 522-ФЗ от 27 декабря 2018 года (с изменениями и дополнениями) закрепил обязанность по установке и обслуживанию «умных» счетчиков за сетевыми организациями и гарантирующими поставщиками.

- Постановление Правительства РФ № 890 от 19 июня 2020 года определяет минимальный набор функций ИСУЭ, включая дистанционное управление нагрузкой, фиксацию параметров качества электроэнергии и хранение профилей мощности.
- Постановление Правительства РФ № 2075 от 19 декабря 2025 года скорректировало правила коммерческого учета, введя ужесточенные штрафные коэффициенты за нарушение сроков поверки и замены приборов учета, а также обновив порядок удаленного допуска приборов в эксплуатацию.
- Постановление Правительства РФ № 719 и Постановление № 1875 регламентируют требования к локализации промышленной продукции. Приборы учета электроэнергии должны быть включены в Единый реестр российской радиоэлектронной продукции Минпромторга и обладать необходимым уровнем локализации (от 113 баллов) для защиты критической информационной инфраструктуры (КИИ).
- ГОСТ Р 71168–2023 стандартизирует применение протокола LoRaWAN на национальном уровне для систем Интернета вещей (IoT) и беспроводного сбора телеметрии.
- СТО 34.01-5.1-009–2024 – обновленный внутренний стандарт ПАО «Россети» (вступил в силу с 1 июля 2025 года), устанавливающий единые технические требования к устанавливаемым интеллектуальным приборам учета электроэнергии (ИПУЭ).

Протокол LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) представляет собой сетевую технологию класса LPWAN (Low-Power Wide-Area Network). В условиях РФ системы функционируют в нелицензируемом частотном поддиапазоне RU864 (864…869,2 МГц).

Применение LoRaWAN для удаленного снятия показаний обладает рядом преимуществ по сравнению с классическими архитектурами (PLC, RS-485, GSM):

– топология «звезда из звезд»: счетчики передают данные напрямую на базовые станции (шлюзы), минуя промежуточные промежуточные концентраторы (УСПД), что снижает общую стоимость инфраструктуры;

– высокая проникающая способность: радиосигнал за счет модуляции спектра устойчив к помехам и обеспечивает связь на расстоянии до 2…3 км в условиях плотной городской застройки и до 15 км на открытой местности;

– энергоэффективность: модули связи оптимизированы под передачу небольших пакетов данных, что критично для автономных датчиков, а в случае стационарных счетчиков снижает паразитную нагрузку на внутренние цепи питания.

Отечественные производители активно интегрируют радиомодули LoRaWAN непосредственно в измерительные приборы, исключая необходимость использования внешних модемов. На рынке выделяются следующие бренды и линейки оборудования:

1. НПК «Инкотекс» (бренд «Меркурий»): модификации счетчиков серий «Меркурий 206» (однофазные) и «Меркурий 234» (трехфазные) оснащаются встроенными модулями LoRaWAN. Они поддерживают дистанционное отключение потребителя с помощью встроенного силового реле по команде из диспетчерского центра, что полностью отвечает требованиям ПП № 890.

2. АО «Энергомера»: линейка приборов учета СЕ208 (в корпусах для установки на DIN-рейку и Сплит-исполнение для установки на опоры ЛЭП) со встроенным радиоканалом LoRaWAN. Решения компании ориентированы на построение облачных АСКУЭ в частном секторе (ИЖС) и дачных товариществах.

3. ООО «Милур Интеллектуальные Системы»: счетчики серии «Милур 105» и «Милур 307». Продукция компании обладает высоким уровнем локализации ЭКБ (электронной компонентной базы) и активно применяется в проектах, требующих строгого соответствия Постановлению № 719.

4. ООО «СПб ЗИП»: выпускает приборы серий ЦЭ2726А и ЦЭ2727А со встроенными модулями 868 МГц, работающими по протоколу LoRaWAN, поддерживающими многотарифное расписание и мониторинг параметров сети в режиме реального времени.

Для агрегации данных в ИСУЭ используются базовые станции отечественного производства (например, линейки компаний Вега-Абсолют, Лартех или rossma), транслирующие пакеты данных через Ethernet или LTE-каналы на сетевой сервер (Network Server) и далее на прикладное ПО верхнего уровня.

Интеграция технологии LoRaWAN в архитектуру ИСУЭ позволяет успешно решать задачи автоматизации энергоучета в рамках актуального законодательства РФ. Выполнение нормативных требований по импортозамещению и локализации (ПП РФ № 719), подкрепленное развитием аппаратной базы отечественных производителей («Инкотекс», «Энергомера», «Милур»), создает надежную основу для построения масштабируемых и кибербезопасных систем удаленного сбора данных в российской энергетике.

Библиографический список

1. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам коммерческого учета электрической энергии : постановление Правительства РФ от 19.12.2025 № 2075.

2. О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности) : постановление Правительства РФ от 19.06.2020 № 890.

3. ГОСТ Р 71168–2023. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции спектра (LoRaWAN).

4. СТО 34.01-5.1-009–2024. Приборы учета электроэнергии. Общие технические требования. ПАО «Россети», 2024.

5. Мельникова, Д. Д. Системы беспроводного удаленного мониторинга показаний приборов учета / Д. Д. Мельникова, А. С. Писарчук, С. П. Москвитин // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы

VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – 2021. – С. 158–159.

6. Мельникова, Д. Д. Самоорганизующиеся сети в технических системах / Д. Д. Мельникова, А. С. Писарчук, С. П. Москвитин // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – 2021. – С. 161–162.

СИНТЕЗ УЛУЧШЕННОЙ СЕКТОРНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

А. В. Останков, Н. А. Скориков

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
(e-mail: rt.kaf@cchgeu.ru)

Во многих радиотехнических системах (радиолокация, связь, РЭБ) требуется формирование диаграммы направленности (ДН) антенной решетки (АР), близкой к идеальной секторной форме: строго равномерное излучение в заданном угловом интервале при подавлении сигнала вне сектора. Как показано в [1], высококачественная секторная ДН может быть реализована на основе эквидистантной линейной АР из слабонаправленных элементов, размещенных с шагом $\lambda/2$ (λ – длина волны излучения), при условии оптимизации амплитудно-фазового распределения на раскрыве.

В работе решена задача параметрического синтеза улучшенной секторной ДН решетки с управляемым компромиссом между равномерностью вершины, крутизной скатов и уровнем бокового излучения при фиксированном числе излучающих элементов [2, 3]. Для поиска оптимального амплитудно-фазового распределения применяется метод параметрической оптимизации с целевой функцией в виде взвешенного среднеквадратического отклонения (СКО) синтезированной ДН от эталонной ДН. Для взвешивания СКО вводится кусочно-постоянная весовая функция $w(\Theta)$, уровни которой в зонах главного лепестка ДН, бокового излучения АР и переходных областях регулируются независимо, что позволяет гибко задавать приоритеты оптимизации согласно априори заявленным техническим требованиям к качеству синтезируемой секторной ДН.

Минимизация целевой функции (СКО) осуществлена модифицированным генетическим алгоритмом, доказавшим результативность при решении многоэкстремальных задачах антенного синтеза [4]. Модификация алгоритма учитывает концентрацию локальных экстремумов в окрестности глобального минимума СКО, что оптимизировало процедуры отбора и скрещивания для гарантированной сходимости. С использованием разработанного программного комплекса выполнены численные эксперименты, засвидетельствовавшие устойчивость эволюционного алгоритма.

Результаты параметрического синтеза показывают возможность и целесообразность прямого управления качеством формируемой секторной ДН через профиль весовой функции СКО. В частности, увеличение весовых коэффици-

ентов вне рабочего сектора (в зоне подавления) для 8-элементной АР сопровождается уменьшением уровня бокового излучения до «минус» 43 дБ при ширине сектора 60° (рис. 1). Для обеспечения равномерности вершины ДН с перепадом менее 0,5 дБ целесообразно кратно (например, в 10 раз) увеличить вес СКО внутри рабочего сектора, что гарантирует уровень боковых лепестков ДН порядка «минус» 24 дБ при сохранении требуемой формы главного лепестка (рис. 2).

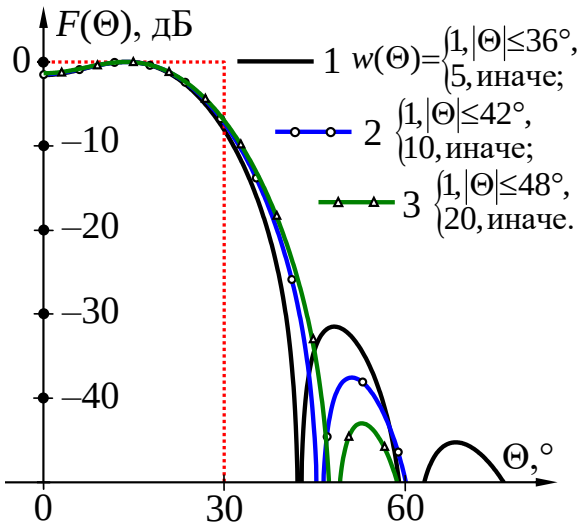


Рис. 1. Секторные ДН при усилении веса СКО в области подавления

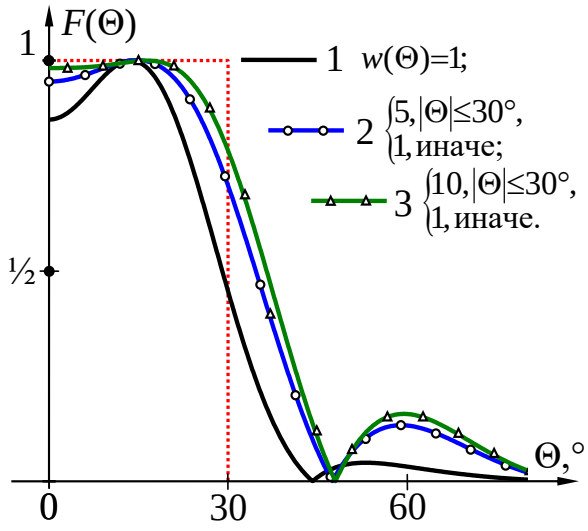


Рис. 2. Секторные ДН при усилении веса СКО в пределах сектора

Установлено, что замена прямоугольного шаблона на предварительно сглаженную функцию и последующий синтез посредством классических методов (Фурье, Котельникова, Вудворда–Лоусона), обеспечивает добавочный выигрыш в подавлении бокового излучения АР. Это достигается за счет более плавных переходов между угловыми зонами и снижения эффекта Гиббса при параметрическом синтезе.

Предложенная методика демонстрирует возможность существенного улучшения секторной ДН АР антенной решетки исключительно за счет алгоритмической настройки профиля целевой функции, без внесения конструктивных изменений в геометрию или топологию раскрыва.

Библиографический список

1. Synthesizing the sector directional pattern with improved quality indicators / A. Ostankov, A. Nechaev, S. Dachian, et al. // 2022 ELEKTRO. – 2022. – P. 1 – 5.

2. Останков, А. В. Формирование секторной диаграммы направленности линейной антенной решетки методом параметрической оптимизации / А. В. Останков, В. В. Ковалевская // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 3. – С. 113 – 120.

3. Special shape directional pattern synthesis based on antenna with a comb reflector / K. M. San, A. Ostankov, A. Rud', et al. // 2021 6th International Conference on Frontiers of Signal Processing, ICFSP 2021 : 6. – Paris, 2021. – P. 33 – 36.

4. Phased antenna array synthesis technique employing special directional patterns and demonstrating improved performance / A. Ostankov, A. Ryabchunov, S. Dachian, et al. // International Journal on Communications Antenna and Propagation. – 2022. – V. 12, No. 3. – P. 218 – 227.

МЕТАМАТЕРИАЛЬНАЯ АНТЕННА С ПОДАВЛЕНИЕМ ДИФРАКЦИИ БРЭГГА ДЛЯ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ

А. В. Останков, Е. Г. Хрипунов, П. В. Чешенко

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
(e-mail: rt.kaf@cchgeu.ru)

Антенны вытекающей волны (АВВ) на основе излучающих линий передачи подразделяются на однородные, периодические и композитные [1]. Периодические и композитные АВВ обеспечивают частотное сканирование диаграммы направленности (ДН), что востребовано в современных системах связи и радиолокации, однако при одностороннем возбуждении проявляется эффект нормали (дифракция Брэгга), снижающий эффективность излучения в поперечном направлении. В последнее десятилетие для реализации АВВ сантиметрового и миллиметрового диапазонов активно применяется технология SIW благодаря простоте изготовления и относительно низким потерям, а актуальной задачей остается создание компактной периодической АВВ для однонаправленного сканирования без дополнительных фильтрующих цепей, компенсирующих эффект нормали [2 – 5].

Излучающая линия АВВ реализована на полуволновом SIW-волноводе (HMSIW), полученном усечением SIW, с размещенным на стенке CSRR-резонатором левостороннего типа. Размер элементарного отрезка на подложке RO4003C (ε_r = 3,38, толщина 0,508 мм) соответствует длине волны на частоте перехода 8 ГГц. Балансировка параметров отрезка левосторонней линии по критерию нулевой фазовой постоянной при минимальном затухании устраняет эффект нормали, обеспечивая возможность непрерывного сканирования ДН. В CST Microwave Studio дисперсионные кривые, рассчитанные напрямую по измеренным *S*-параметрам отрезка линии, показали полосу заграждения у несбалансированных отрезков на 8 ГГц, устраняемую оптимизацией размеров CSRR для обеспечения непрерывного сканирования ДН.

Излучающий раскрыв антенны реализован как каскадное соединение 10 сбалансированных элементарных отрезков (оптимальная длина 204 мм или 6λ). Для ввода волны возбуждения и согласования использованы микрополосковые переходы с конусными трансформаторами [6] (рис. 1).

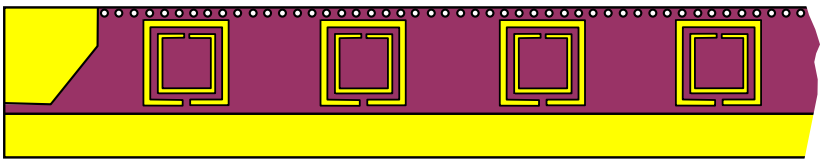


Рис. 1. Излучающий раскрыв метаматериальной антенны

Результаты полноволнового электромагнитного моделирования показали, что разработанная метаматериальная СВЧ-антенна обеспечивает частотное сканирование диаграммы направленности в угловом секторе 50° при изменении частоты возбуждения от 7,2 до 7,9 ГГц. При этом коэффициент усиления составляет 10,4…12,5 дБ, а эффективность излучения варьируется в пределах от 75 до 81%. Оптимальная длина излучающего раскрыва антенны, определенная по критерию максимума усиления, составила 204 мм (6λ) при 10 элементарных отрезках, что позволяет сохранить компактность антенны при условии обеспечения уровня бокового излучения не выше «минус» 10 дБ и общей эффективности не менее 55%.

Экспериментальные исследования макета АВВ (векторный анализатор) показали смещение рабочей полосы менее чем на 2% относительно результатов моделирования. Расхождения обусловлены технологическими погрешностями изготовления и неучтенными потерями в разъемах.

Разработана компактная периодическая АВВ с обратным направлением излучения и эллиптической поляризацией для частотного сканирования ДН в диапазоне 7,2…7,9 ГГц. Использование сбалансированных левосторонних элементарных отрезков с CSRR позволило минимизировать влияние дифракции Брэгга и обеспечить сканирование в секторе 50° без дополнительных фильтров. Предложена методика ускоренного синтеза элементарного отрезка на основе совместного использования полноволнового моделирования и эквивалентных схем на сосредоточенных элементах. Эксперимент подтвердил достоверность расчетных данных и практическую реализуемость конструкции.

Библиографический список

1. High efficiency dielectric periodic leaky wave antenna in the transverse radiation mode / A. V. Ostankov, D. Y. Kryukov, A. Y. Chernyshev, et al. // International Journal on Communications Antenna and Propagation. – 2025. – V. 15, No. 1. – P. 19 – 29.

2. Компактная антенна вытекающей волны со сканированием диаграммы направленности на основе композитных право- и левосторонних структур / С. А. Антипов, Ю. Е. Калинин, А. В. Останков и др. // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 6. – С. 34 – 39.

3. Ostankov, A. A compact nonuniform composite right/left-handed leaky-wave scanning antenna with elliptical polarization for X-band application / A. Ostankov, E. Khripunov, V. Kashkarov // Progress In Electromagnetics Research C. – 2021. – V. 114. – P. 43 – 56.

4. Останков, А. В. Антенна на основе метаматериала для сканирования сектора пространства / А. В. Останков, Е. Г. Хрипунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 2. – С. 116 – 125.

5. Частотно-сканирующая линейная периодическая антенна вытекающей волны / Е. Г. Хрипунов, А. В. Останков, Н. Н. Щетинин и др. // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2025. – № 1. – С. 9 – 19.

6. Останков, А. В. Рупорная SIW-антенна со специальным копланарным переходом и диэлектрической линзой для питания планарной антенны вытекающей волны / А. В. Останков, Е. Г. Хрипунов // Радиостроение. – 2020. – № 2. – С. 1 – 26.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВИРТУАЛЬНЫХ ПОДСЕТЕЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

И. И. Пасечников, М. Ф. Гасанов, В. В. Тарасов, С. А. Донцов

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия
(e-mail: pasechnikov_ivan@mail.ru)

В работе [1] показано, что параллельная передача пакетов сообщений ограниченного информационного размера в низкоскоростных каналах связи виртуальных сетей позволяет повысить системные характеристики пакетной радиосети (ПРС). Известен способ повышения помехоустойчивости и скрытности передачи речевого сообщения по низкоскоростным каналам связи речи [2], который основан на параллельной передаче речевых данных. Учитывая важность применения режима параллельной передачи в виртуальных сетях, актуальной является задача управления пропускной способностью пула каналов однонаправленной передачи параметрами передаваемого сообщения.

Цель работы: повысить информационную эффективность ПРС путем создания подсистемы передачи информации сетевого типа с динамически управляемой структурой виртуальной подсети типопараметром передаваемых сообщений.

Поток сообщений определенного типа имеет свои статистические характеристики. К ним относятся средняя интенсивность и характер поступления трафика, размеры передаваемых пакетов, требования к синхронности, скорости передачи, времени задержки пакетов, верхняя граница джиттера, вероятность потерь пакетов и др. Сообщения могут отличаться большими размерами и одновременно с этим иметь одинаковые требования к временной задержке и к значению джиттера. В целях обеспечения гарантированной доставки сообщений заданных типовых параметров в однородной ПРС можно формировать виртуальные подсети, обладающие производительностью значительно выше одного виртуального соединения за счет формирования n параллельных, непересекающихся путей. Очевидно, топология ПРС должна обладать структурной избыточностью и повышенной связностью.

Функциональная связь «параметры потока сообщений – характеристики виртуальной сети» осуществляется механизмом управления виртуальной подсетью. На рисунке 1 показан пример соответствия уровней размера сообщений (при условии одинаковости их приоритетов) коэффициентам использования ресурсов ретрансляторов и связности виртуальной сети. Очевидно, количество задействованных ретрансляторов и резервируемый ими ресурс кибернетиче-

ской мощности ПРС (в простейшем случае пропускной способности канала, емкости буферных устройств, вычислительных ресурсов и др.) определяет глубину модуляции избыточной топологии сети. Структура системы связи, реализующей рассматриваемый подход, приведена на рис. 2.

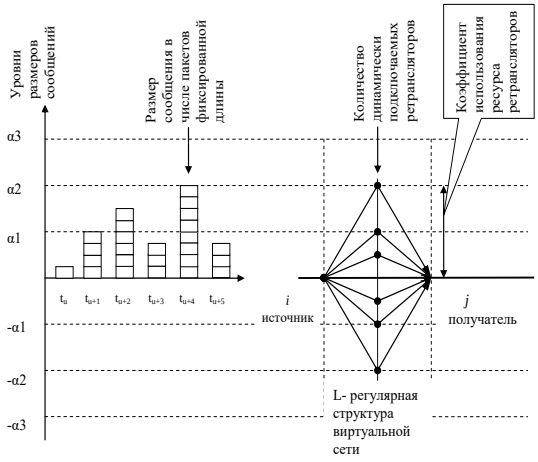


Рис. 1. Управление параметром сообщений структурными характеристиками виртуальной сети



Рис. 2. Структурная схема системы связи с управляемыми структурами виртуальных подсетей

Формирование потребной виртуальной подсети предусматривает создание таблицы виртуальных подсетей, соответствующих параметрам передаваемых сообщений. На основе этой таблицы каждый узел-отправитель сообщений в направлении адресата формирует упорядоченную нечеткую структуру. Она представляет собой, в общем, многотранзитную сеть, в которой до узла адресата имеется непустое множество непересекающихся путей. Каждый путь, оцениваясь значением функции принадлежности к сети μ_α, которая попадая в интервал $\left[\mu_{\alpha_i}, \mu_{\alpha_{i+1}}\right]$, в соответствии с теоремой декомпозиции, заносится в подсеть α_i-уровня. Такая сеть имеет только свое, допустимое количество параллельных путей для передачи информации. На основе квантов ресурса, получаемых от соседних узлов, узел-отправитель определяет возможность использования виртуальной сети с повышенной эффективностью передачи данных.

Библиографический список

1. Пасечников, И. И. Анализ и методы повышения информационной эффективности телекоммуникационных систем и сетей : монография / И. И. Пасечников. – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2010. – 118 с.

2. Пат. на изобретение RU № 2840298, МПК H04B 7/00 H04B 1/00 / Пасечников И. И., Гасанов М. Ф., Тарасов В. В., Алексеенко И. А., Федоров В. А. Патентообладатель ООО «Конструкторское бюро телекоммуникационных физико-технических систем» ; заявка : 2024116383, 13.06.2024 ; опубл. : 21.05.2025, Бюл. № 15.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМНОГО ТРАКТА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С УЧЕТОМ УРОВНЯ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ

В. А. Рыбалка

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: rybalka.va@students.dvfu.ru)

При проектировании приемных трактов аналоговых и цифровых систем связи одной из ключевых задач является обеспечение требуемого соотношения сигнал/шум (SNR) при заданной чувствительности устройства. Увеличение коэффициента усиления (КУ) позволяет повысить уровень полезного сигнала, однако одновременно усиливаются собственные шумы элементов тракта, что может привести к ухудшению качества приема и перегрузке последующих каскадов.

В работе [1] рассмотрен метод расчета коэффициента усиления приемного тракта оптической системы связи с учетом суммарных шумов элементов. Приемный тракт устройств включает фотодиод, трансимпедансный усилитель на операционном усилителе, каскад дополнительного усиления, полосовой фильтр, буферный каскад и аналого-цифровой преобразователь. Основной вклад в формирование коэффициента усиления вносят трансимпедансный усилитель и усилительный каскад.

Для дальнейшего расчета и моделирования необходимо выбрать используемые элементы: фотодиод SFH203A и операционный усилитель ADA4817. Номиналы элементов схемы, представленной на рис. 1, были выбраны исходя из технических рекомендаций на ADA4817 и требуемых параметров входного сопротивления каскадов, коэффициента усиления, полосы пропускания и т.д.

Используя формулы, представленные в [1], рассчитывается общий уровень шумов для представленных трактов при данных параметрах схемы. Общий уровень шумов схемы в полосе пропускания схемы составляет 36 мВ, или плотность шумов при полосе пропускания 10 МГц равна 12,7 мкВ/√Гц.

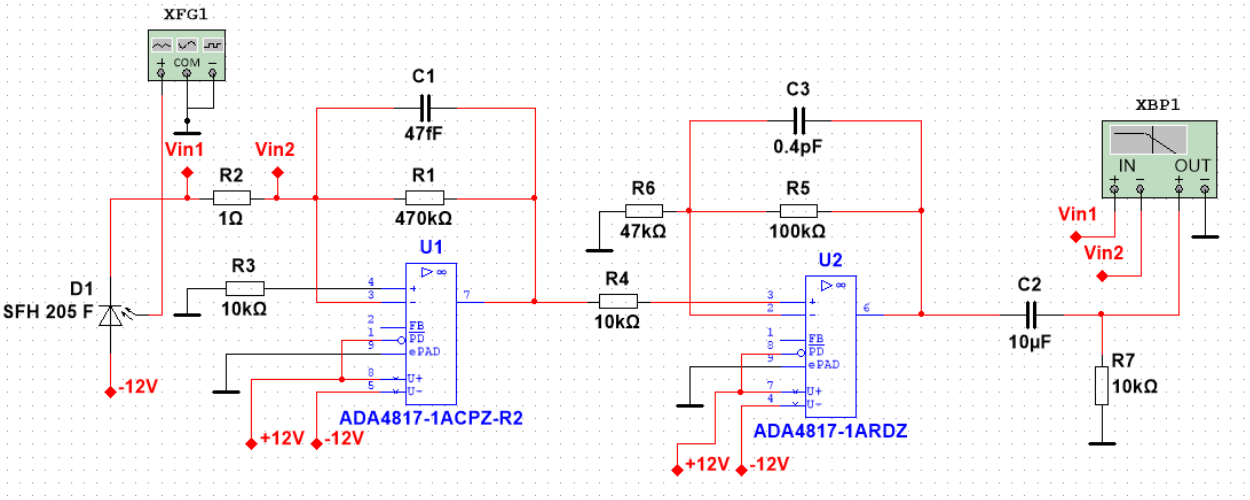


Рис. 1. Схема приемного тракта оптической системы связи

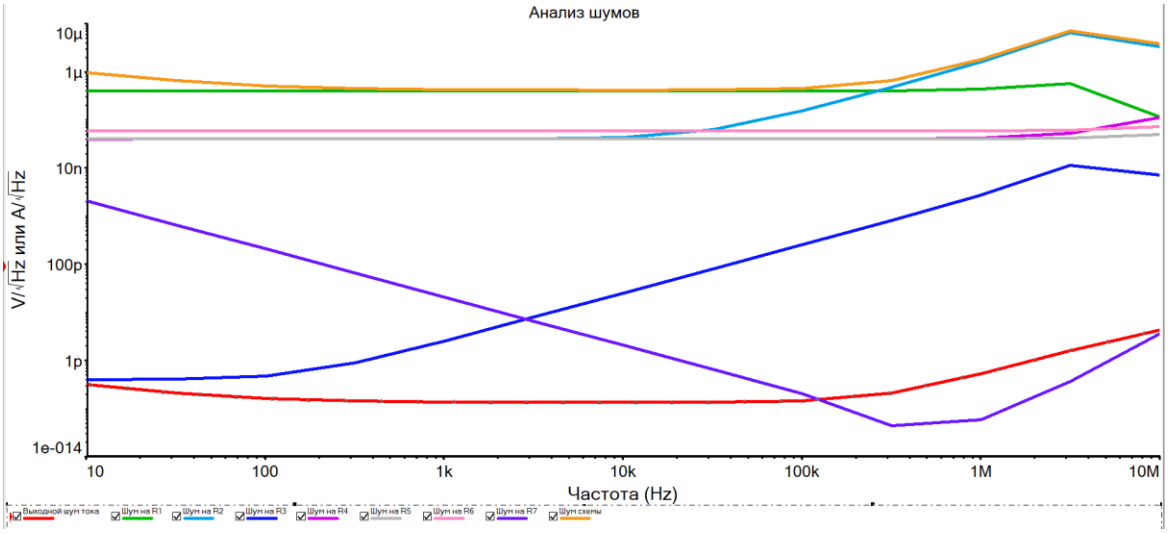


Рис. 2. Результаты моделирования анализа шумов:
оранжевый – итоговый шум схемы; красный – выходной шум тока; зеленый – шум на R1; голубой – шум на R2; синий – шум на R3; пурпурный – шум на R4; серый – шум на R5; розовый – шум на R6; фиолетовый – шум на R7

Далее был проведен анализ шумов с помощью программной среды Multisim 14.1. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Согласно рис. 2, максимальная плотность шума в схеме составляет 10 мкВ/√Гц. Следовательно, на данной частоте уровень шумов будет примерно равен 32 мВ. При этом при заданных элементах схемы при входном токе с фотодиода 1 мкА выходное напряжение составит около 3,2 В. А значит SNR приемного тракта при таком уровне сигнала равен 40 дБ.

Погрешность между расчетным и полученным в результате моделирования значениями составляет 4 мВ, а разница в SNR составит около 1 дБ (расчетное SNR при том же уровне полезного сигнала 3,2 В составит 38,98 дБ). Следовательно, данная модель применима для первичной оценки шумов в схеме с трансимпедансным усилителем. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании приемных устройств оптических и радиотехнических систем.

Библиографический список

1. Рыбалка, В. А. Оптимизация коэффициента усиления приемного тракта оптической системы связи на основе соотношения сигнал/шум / В. А. Рыбалка ; под общ. ред. Р. А. Полькова // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы : материалы Региональной науч.-практ. конф. молодых ученых, Владивосток, 15 декабря 2025 – 16 января 2026 гг. – С. 433 – 438.

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА В СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

А. А. Ситников, Б. В. Лежанкин

Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия
(e-mail: lezhbor@mail.ru)

Безопасность, регулярность и эффективность полетов является основой при организации воздушного движения (ОрВД) в гражданской авиации [1]. Трассовый радиолокатор (ТРЛ) является основным средством, обеспечивающим визуализацию пространственного положения воздушных судов (ВС), выполняющих полет по воздушным трассам и находящихся под управлением службы движения Региональных центров ОрВД. Технология работы ТРЛ полностью описывается процессом функционирования радиолокационного канала, состоящего из набора технических средств, отвечающих процесс формирования, передачи сигналов, среды распространения и устройств приема и обработки, реализующих функцию наблюдения за процессом пространственного движения [2]. В связи с этим актуальной задачей является разработка программной модели радиолокационного канала, содержащей все этапы реализации процесса формирования, распространения и обработки радиолокационных сигналов. На основе структуры радиосигналов в радиолокационном канале в среде программирования «NI LabVIEW» реализована модель устройства формирования и обработки сигналов ТРЛК, панель управления которой представлена на рис. 1.

В модели реализован процесс формирования двух типов сигналов: коротких радиоимпульсов и длинных радиоимпульсов с линейной частотной модуляцией. Модель позволяет изменять характеристики формируемых сигналов, а также имитировать процесс распространения в пространстве за счет изменения времени задержки и амплитуды принимаемого сигнала (управление дальностью до ВС) и уровнем шума, накладывающегося на сигнал.

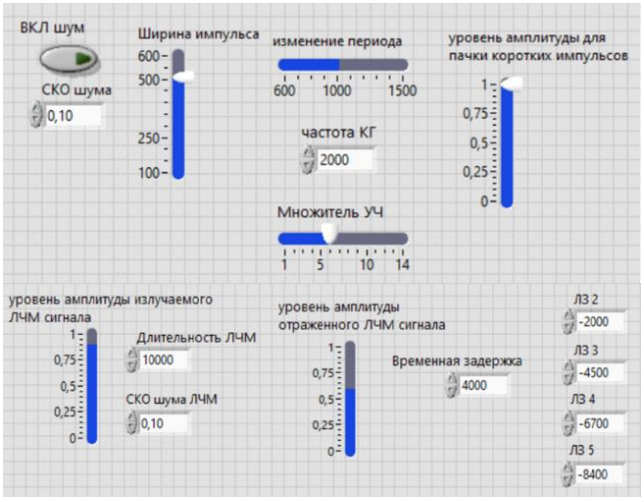


Рис. 1. Панель управления параметрами формируемых и обрабатываемых сигналов

Результаты моделирования, раскрывающие процесс функционирования радиолокационного канала, представлены на рис. 2. Короткие радиоимпульсы предназначены для осуществления обзора в ближней зоне ответственности ТРЛ (энергетика в сигнале мала), длинные радиоимпульсы обеспечивают обзор дальней зоны, а именно ВС, находящихся на воздушной трассе. Процесс приема и обработки сигналов содержит ряд стандартных процедур приема отраженных от ВС сигналов: избирательности, частотного преобразования, детектирования и сжатия в ходе оптимальной обработки осциллограммы сигналов, которые представлены на рис. 3. В результате моделирования представлены результаты полного функционирования радиолокационного канала, что позволяет полностью реализовать все процедуры радиолокационного наблюдения за ВС, находящихся в зоне ответственности службы движения Региональных центров ОрВД.

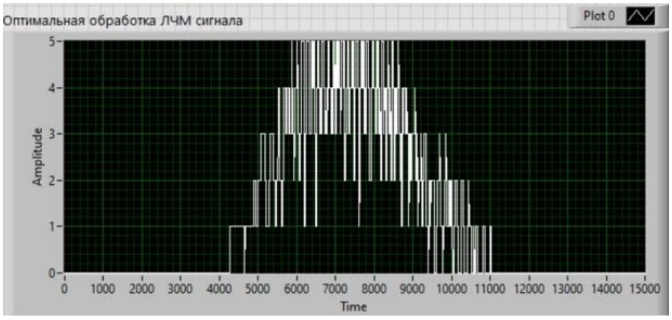


Рис. 2. Осциллограмма пачки коротких радиоимпульсов и длинных с ЛЧМ модуляцией при формировании и приеме

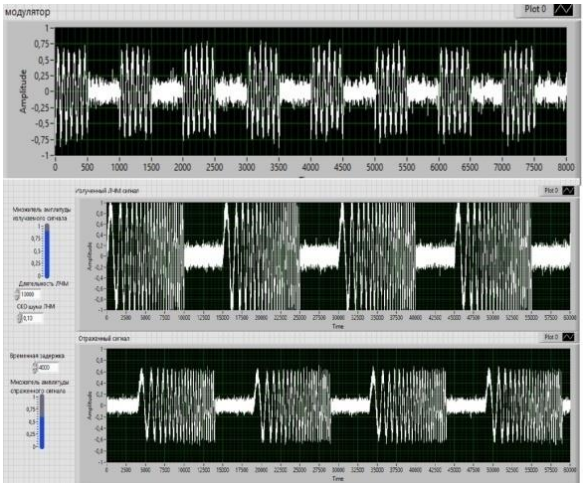


Рис. 3. Осциллограмма отраженного от ВС сигнала после оптимальной обработки

Библиографический список

1. Оценка параметров многопозиционной системы наблюдения на основе адаптивного фильтра Калмана / В. В. Ерохин, Б. В. Лежанкин, Э. А. Болелов, Д. Ю. Урбанский // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2024. – № 46. – С. 9 – 19.

2. Лежанкин, Б. В. Управление траекторией полета беспилотного летательного аппарата при различной конфигурации источников навигационной информации / Б. В. Лежанкин, В. В. Ерохин, Н. П. Малисов // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2024. – № 1. – С. 113 – 127.

АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РСА К НЕИЗВЕСТНЫМ ПАРАМЕТРАМ АКТИВНЫХ ПОМЕХ

А. В. Степанова, Д. А. Чистилин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

Для достижения наиболее полного эффекта подавления помех необходимо учитывать как пространственные, так и временные отличия принимаемого полезного сигнала, отраженного от земной поверхности и всех, действующих на РСА, помех, а также иметь достаточно полное их статистическое описание [1].

Задача синтеза алгоритмов пространственно-временной фильтрации дискретных отсчетов $\dot{E}_l$ комплексной функции радиолокационного рельефа формулируется следующим образом. На вход антенной системы РСА, представленной антенной решеткой, состоящей из K элементов, поступают полезный сигнал, отраженный от земной поверхности и помеховые сигналы от S станций активных помех. На основании анализа принятой аддитивной смеси полезного сигнала, внешних помех и внутреннего шума приемных каналов, которая находится по выражению

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_\nu = \dot{\mathbf{H}}_\nu \cdot \dot{\mathbf{E}}_\nu + \dot{\mathbf{n}}_\nu, \qquad (1)$$

требуется оптимальным образом оценить дискретные отсчеты $\dot{E}_l$, уравнение состояния которых для любого вида обзора подстилающей поверхности можно записать следующим образом:

$$\dot{\mathbf{E}}_\nu = \dot{\mathbf{A}}_\nu \cdot \dot{\mathbf{E}}_{\nu-1} + \dot{\mathbf{n}}_{o\nu}. \qquad (2)$$

Так как обзор телескопический, то

$$\dot{\mathbf{E}}_\nu = \dot{\mathbf{E}}_{\nu-1}. \qquad (3)$$

Уравнение (3) является частным случаем уравнения (2) при единичной матрице переходов $\dot{\mathbf{A}}_\nu = \mathbf{I}$ и нулевой дисперсии всех компонент вектора формирующих шумов $\dot{\mathbf{n}}_{o\nu}$. Направления прихода помеховых сигналов произвольны.

Алгоритмы стандартной гауссовской аппроксимации, используемые для нахождения элементов корреляционной матрицы помех и шумов в каналах приема $\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}$, в ряде случаев при определенном задании начальных условий оказываются неработоспособными или неприемлемыми к решению поставленной задачи. Поэтому для оценки вектора $\dot{\mathbf{E}}_\nu$ в РСА при действии помех с неизвестными характеристиками для решения задачи адаптивной фильтрации используют приближенные методы, одним из которых является метод «прямого выбора» [2].

Для получения оптимальной оценки $\dot{\mathbf{E}}_\nu$ необходимо найти максимум апостериорной плотности вероятности $p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu / \dot{\xi}_\nu\right)$, а при априорной неопределенности относительно параметров активных помех и внутренних шумов согласно байесовскому подходу необходимо оперировать уже совместной плотностью вероятности $p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)$. В этом случае

$$p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu / \dot{\xi}_\nu\right) = \int_{-\infty}^{\infty} p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right) d\,\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}. \tag{4}$$

Совместную апостериорную плотность вероятности $p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)$ найдем следующим образом:

$$p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right) = p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right) p\left(\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right). \tag{5}$$

Апостериорная плотность вероятности $p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)$ своего абсолютного максимума достигает тогда и только тогда, когда максимальны обе плотности вероятности $p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)$ и $p\left(\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)$, при этом $\dot{\mathbf{E}}_\nu = \dot{\mathbf{E}}_{\nu\text{ист}}$ и $\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} = \dot{\mathbf{V}}_{\nu\text{ист}}^{-1}$. Таким образом, из (5)

$$p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu / \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}, \dot{\xi}_\nu\right) = \frac{p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)}{p\left(\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)}. \tag{6}$$

Следовательно, согласно (6), задача оценки компонент вектора $\dot{\mathbf{E}}_\nu$ сводится к решению задачи фильтрации при фиксированных значениях $\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}$. В условиях априорной неопределенности относительно параметров активных помех и внутренних шумов для нахождения максимума $p\left(\dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1} / \dot{\xi}_\nu\right)$ необходимо найти максимум функции правдоподобия $p\left(\dot{\xi}_\nu / \dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}\right)$.

Суть метода «прямого выбора» состоит в том, что область возможных значений оцениваемых сопутствующих параметров (элементов матрицы $\dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}$) дискретизируется, т.е. элементы $\dot{\vartheta}_{ij}$ принимают множество значений $\dot{\vartheta}_{mij}, m = \overline{1, M}$. В этом случае необходимо вычислять $p\left(\dot{\xi}_\nu / \dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}\right)$ только в конечном числе точек $\dot{\vartheta}_{mij}$. Функция правдоподобия переходит при этом в выражение

$$p\left(\dot{\xi}_\nu / \dot{\mathbf{E}}_{\nu m}, \dot{\mathbf{V}}_{\nu m}^{-1}\right) = (2\pi)^{-\frac{k}{2}} \left|\dot{\mathbf{V}}_{\nu m}\right|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\dot{\xi}_\nu - \dot{\mathbf{H}}_\nu \dot{\mathbf{E}}_{\nu m}\right)^* \dot{\mathbf{V}}_{\nu m}^{-1} \left(\dot{\xi}_\nu - \dot{\mathbf{H}}_\nu \dot{\mathbf{E}}_{\nu m}\right)\right\}. \tag{7}$$

Для нахождения оценок компонент вектора $\dot{\mathbf{E}}_{\nu m}$ применяется стандартная гауссовская аппроксимация, в этом случае $\dot{\mathbf{E}}_{\nu m}$ находится при фиксирован-

ных значениях $\dot{\vartheta}_{mij}$. Значения $\dot{\vartheta}_{mij}$ и $\dot{\mathbf{E}}_{\nu m}$ при которых функция правдоподобия $p\left(\dot{\xi}_\nu / \dot{\mathbf{E}}_\nu, \dot{\mathbf{V}}_\nu^{-1}\right)$ максимальна, принимаются за истинные, т.е. $\hat{\dot{\mathbf{E}}}_\nu = \dot{\mathbf{E}}_{\nu m}$ и $\hat{\dot{\vartheta}}_{ij\nu} = \dot{\vartheta}_{mij\nu}$. Количество интервалов дискретизации определяется исходя из влияния сопутствующих параметров на функцию правдоподобия.

Библиографический список

1. Куликов, Е. И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е. И. Куликов, А. П. Трифонов.– М. : Советское радио, 1978. – 296 с.

2. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихинов. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РЛС УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

А. В. Степанова, Д. А. Чистилин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

Задача оценки помехоустойчивости сводится к выбору специальных показателей, которые могут служить мерой эффективности соответствующих алгоритмов, а также к определению путей нахождения их значений при выбранных параметрах системы в целом и внешних воздействиях, в том числе и активных помех.

Таким образом оценку помехоустойчивости типового диспетчерского радиолокатора выполним с помощью такого показателя как отношение сигнал/помеха [1, 2]:

$$q_{\text{сп}} = \frac{2E}{\left(N_0 + N_{\text{п}}\right)}, \tag{1}$$

где E – энергия сигнала; N_0 – спектральная плотность шума; $N_{\text{п}}$ – спектральная плотность помехи.

Энергия сигнала, отраженного от цели, определяется выражением

$$E = \frac{P_{\text{и}} F_{\text{п}} T_{\text{н}} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 D_{\text{ц}}^2 \Delta F_{\text{пр}}}, \tag{2}$$

где $P_{\text{и}}$ – импульсная мощность передатчика; $F_{\text{п}}$ – частота повторения импульсов; $T_{\text{н}}$ – время наблюдения цели; G – КНД антенны; λ – длина волны; σ – ЭПО цели; $D_{\text{ц}}$ – дальность до цели; $\Delta F_{\text{пр}}$ – ширина полосы пропускания приемника.

Спектральные плотности собственных шумов приемника и помехи представлены выражениями (3) и (4), соответственно [1, 3]:

$$N_0 = kT_0 k_{\text{ш}}; \tag{3}$$

$$N_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}} G_{\text{п}} \lambda^2 G_{\text{БЛ РЛС}}}{(4\pi)^2 D_{\text{п}}^2 \Delta F_{\text{п}}}, \qquad (4)$$

где k – постоянная Больцмана; T_0 – абсолютная температура приемника; $k_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемника; $P_{\text{п}}$ – мощность помехи; $G_{\text{п}}$ – КНД станции помех; $G_{\text{БЛ РЛС}}$ – КНД боковых лепестков антенны РЛС; $D_{\text{п}}$ – дальность до станции активных помех (САП); $\Delta F_{\text{п}}$ – ширина спектра помехового сигнала.

Как показал анализ полученных данных, наибольшее отношение сигнал/помеха во всем диапазоне дальностей обеспечивается при отсутствии помехового воздействия, а при воздействии источника активных помех мощностью 100 Вт, дальность обнаружения целей снижается до 58 км, при дальности до САП 100 км. При дальности до САП 50 км дальность обнаружения равна 41 км, а при дальности до САП 30 км дальность обнаружения уже составляет 32 км.

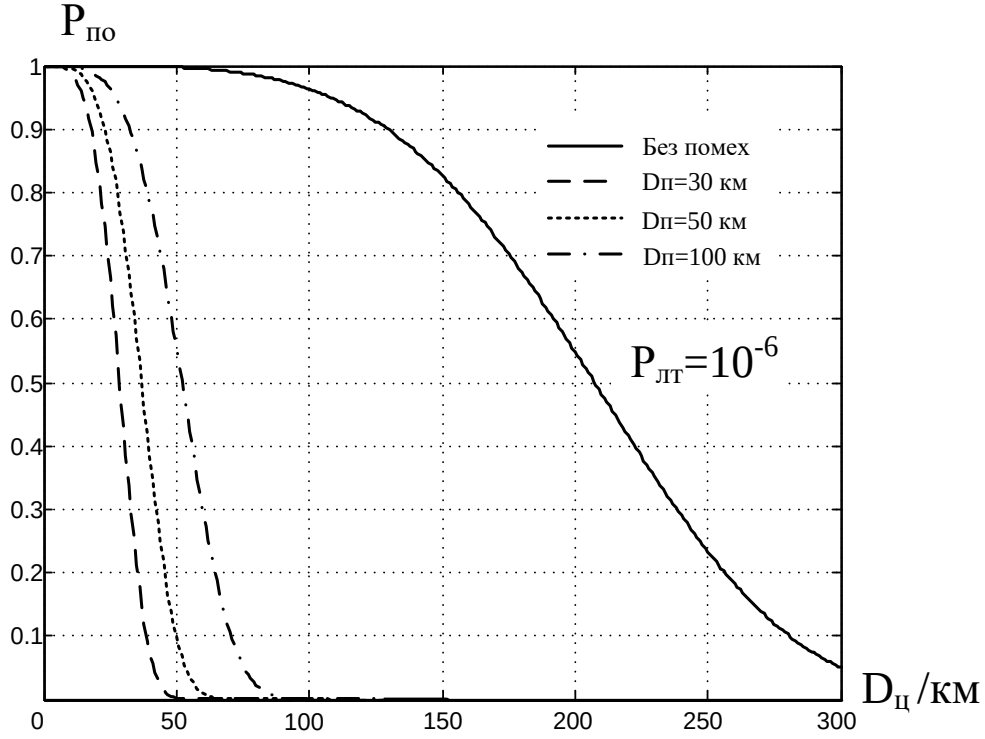


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного обнаружения от дальности до цели

При управлении воздушным движением на первый план выступает задача обнаружения целей. При этом эффективность применения диспетчерского радиолокатора можно оценить при помощи такого показателя, как вероятность правильного обнаружения $P_{\text{по}}$. При этом используется критерий Неймана-Пирсона, согласно которому максимизируется вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложных тревог $P_{\text{лт}}$.

На рисунке 1 показано изменение вероятности правильного обнаружения $P_{\text{по}}$ цели с эффективной площадью рассеяния 40 м^2 от дальности до обнаруживаемой цели $D_{\text{ц}}$ при различном удалении САП от ДРЛ-6М2. Анализ данного рисунка показывает, что воздействие активных помех приводит к снижению дальности обнаружения цели при заданных вероятностных характеристиках.

Так, при дальности до САП 100 км дальность обнаружения целей снижается до 32 км, при дальности до САП 50 км дальность обнаружения равна 23 км, а при $D_п$ = 30 км дальность обнаружения составляет всего 18 км.

Применение активных помех затрудняет получение информации обзорными радиолокаторами о координатах воздушных судов, находящихся в зоне аэродрома. Это может привести к нарушению нормальной работы системы управления полетами, снижению безопасности полетов, невыполнению боевого задания [1]. Для повышения помехоустойчивости современных диспетчерских радиолокаторов используются различные способы селекции по отдельным параметрам полезного сигнала, осуществляется подавление пассивных помех и выделение движущихся целей.

Библиографический список

1. Справочник офицера воздушно-космической обороны / под. ред. С. К. Бурмистрова. – Тверь : ВА ВКО, 2006. – 564 с.

2. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь,1983. – 320 с.

3. Справочник по связи и радиотехническому обеспечению полетов / под. ред. Р. С. Терского. – М. : Воениздат, 1979. – 286 с.

4. Васин, В. В. Справочник-задачник по радиолокации / В. В. Васин, Б. М. Степанов. – М. : Сов. радио,1977. – 320 с.

5. Перевезенцев, В. П. Радиолокационные системы аэропортов / В. П. Перевезенцев, А. И. Агарков. – М. : Транспорт, 1991.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ МАГНИТНОГО ТОЛЩИНОМЕРА

Д. И. Стрекалов

Тамбовский государственный университет, Тамбов, Россия
(e-mail: strekalovdimitry@yandex.ru)

Современные магнитные толщиномеры претерпевают модернизацию по нескольким ключевым направлениям. Во-первых, повышается точность и стабильность измерений за счет усовершенствования конструкции датчиков, использования высокоточных источников питания и внедрения цифровой обработки сигналов. Во-вторых, расширяется функционал приборов посредством автоматизации калибровки, интеграции памяти для хранения данных и разработки интерфейсов для взаимодействия с компьютерами. В-третьих, улучшаются эргономические показатели: уменьшаются масса и габариты, увеличивается время автономной работы и оптимизируется управление [2, 3].

Для расширения спектра контролируемых объектов разрабатываются универсальные толщиномеры, способные измерять толщину покрытий как на ферромагнитных, так и на немагнитных подложках. Решение этой задачи до-

стигается применением комбинированных преобразователей, объединяющих элементы индукционного и вихретокового датчиков [3].

Принцип вихретокового метода заключается в регистрации изменений вихревых токов, наведенных в проводящем основании переменным магнитным полем от возбуждающей обмотки. Непроводящее немагнитное покрытие, расположенное между обмоткой и основанием, влияет на амплитуду и фазу вихревых токов, что фиксируется измерительной обмоткой. Вихретоковые толщиномеры успешно применяются для контроля покрытий на таких материалах, как алюминий, медь, латунь и немагнитная сталь [2, 3].

Комбинированный преобразователь включает общую возбуждающую обмотку и две измерительные – индукционную и вихретоковую. Индукционная обмотка, работающая на низкой частоте (5…10 кГц), фиксирует изменения магнитного потока, обусловленные наличием ферромагнитного основания. Вихретоковая обмотка, функционирующая на высокой частоте (50…100 кГц), регистрирует вихревые токи в проводящем основании. Прибор автоматически определяет тип основания по соотношению сигналов от обеих обмоток и активирует соответствующий канал измерения [3].

Использование комбинированных преобразователей позволяет создавать универсальные толщиномеры, обеспечивающие контроль широкого ассортимента покрытий на разнообразных основаниях без необходимости смены датчиков. Диапазон измерений для магнитного канала составляет 0…2 мм, для вихретокового – 0…1,5 мм, при погрешности ±1…3% от измеряемого значения [3].

Библиографический список

1. Любчик, А. Н. Способ дистанционного магнитометрического контроля технического состояния магистральных трубопроводов / А. Н. Любчик // Записки Горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 268 – 271. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-distantsionnogo-magnitometricheskogo-kontrolya-tehnicheskogo-sostoyaniya-magistralnyh-truboprovodov (дата обращения: 21.04.2026).

2. Новиков, В. А. Границы применения магнитного метода контроля с использованием визуализирующей поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 2. – С. 89 – 98. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/granitsy-primeneniya-magnitnogo-metoda-kontrolya-s-ispolzovaniem-vizualiziruyuschey-polya-plenki (дата обращения: 21.04.2026).

3. Толщиномеры покрытий магнитные ТМ-МГ4. Описание типа средства измерений // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – 2024. – URL : https://all-pribors.ru/opisanie/59933-15-tm-mg4 (дата обращения: 21.04.2026).

4. Пат. № 22/0058c/RU. Способ непрерывного контроля толщины слоев биметалла с ферромагнитным основанием / Плужников Ю. В., Колмаков А. В., Пудовкин А. П. ; № 2002102151/28 ; заяв. 23.01.2002 ; опубл. 10.08.2003.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ВИХРЕТОКОВЫМ ТОЛЩИНОМЕРОМ

Д. И. Стрекалов

Тамбовский государственный университет, Тамбов, Россия
(e-mail: strekalovdimitry@yandex.ru)

Несмотря на высокую чувствительность вихретокового метода, его практическое применение сопряжено с рядом методических вызовов. Получаемые результаты измерений подвержены влиянию не только толщины исследуемого покрытия, но и множества посторонних факторов, среди которых выделяются:

Геометрические особенности поверхности: кривизна и шероховатость контролируемого объекта.

Неоднородность электропроводности: локальные вариации удельного сопротивления как основного материала, так и наносимого покрытия.

Термические воздействия: температурные флуктуации, влияющие на параметры как измеряемых материалов, так и самого измерительного оборудования.

Ориентация преобразователя: отклонение датчика от перпендикулярного положения относительно поверхности.

Влияние границ объекта: краевые эффекты, возникающие при приближении к краям контролируемой зоны.

Кривизна поверхности оказывает прямое воздействие на эффективное расстояние между датчиком и металлической основой, что неизбежно приводит к искажению получаемых показаний [1]. Для минимизации данного искажения применяются два основных подхода: калибровка на эталонных образцах, обладающих аналогичной кривизной, или использование программных алгоритмов коррекции, учитывающих специфическую геометрию исследуемого объекта.

Шероховатость поверхности вносит дополнительный элемент неопределенности, поскольку микронеровности создают переменный воздушный зазор между датчиком и материалом. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при показателе шероховатости поверхности Ra, превышающем 10 мкм, погрешность измерений может увеличиваться в 1,5–2 раза [1]. Для решения этой проблемы эффективным является применение датчиков с эластичными наконечниками, способными адаптироваться к микрорельефу поверхности, либо использование методов усреднения результатов серии измерений.

Изменение электропроводности основного материала представляет собой один из наиболее трудноустранимых источников погрешностей. Локальные структурные трансформации материала (например, в зоне термического влияния сварного шва) вызывают флуктуации удельного сопротивления (σ), которые прибор ошибочно интерпретирует как изменение толщины покрытия [2]. Амплитудно-фазовый метод позволяет частично разделить влияние толщины и проводимости, анализируя траекторию сигнала в комплексной плоскости, что способствует отстройке от мешающих факторов.

Наклон датчика относительно нормали к поверхности приводит к снижению амплитуды регистрируемого сигнала и смещению его фазы [3]. При угле наклона, превышающем 10°, погрешность измерений может выйти за допустимые пределы. Современные измерительные системы оснащаются функциями автоматического контроля ориентации датчика или используют конструктивные решения с механизмом самоориентации по нормали.

Краевые эффекты проявляются, когда датчик располагается в непосредственной близости от края объекта – на расстоянии менее двух диаметров преобразователя. В таких условиях часть магнитного поля выходит за пределы контролируемого материала, что приводит к снижению плотности индуцируемых вихревых токов и, как следствие, к искажению конечного результата [4]. Оптимальным решением является соблюдение отступа от краев объекта не менее чем на (2…3)*d*, где *d* обозначает диаметр используемого датчика.

Библиографический список

1. Справочник дефектоскописта: Вихретоковый толщиномер. – URL : https://nerkon.ru/poleznoe/spravochnik_defektoskopista/vihretokovii_tolshinomer (дата обращения: 21.02.2026).

2. Вихретоковые толщиномеры покрытий. Дефектоскопист Центр. – URL : https://www.defectoskopist.ru/izmereniyetolshchiny-pokrytiy (дата обращения: 21.02.2026).

3. Выбор параметров вихретокового контроля при оценке глубины дефектов, возникающих в углерод-углеродных композиционных материалах / С. С. Пичугин, С. И. Яковлева, В. В. Кулаков и др. // Труды ВИАМ. – 2025. – № 6. – С. 98 – 109. – URL : http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=2299 (дата обращения: 21.02.2026).

4. Электромагнитный (вихретоковый) контроль : Справочное пособие. – URL : https://helpiks.org/4-71467.html (дата обращения: 21.02.2026).

5. Пат. № 22/0058c/RU. Способ непрерывного контроля толщины слоев биметалла с ферромагнитным основанием / Плужников Ю. В., Колмаков А. В., Пудовкин А. П. ; № 2002102151/28 ; заяв. 23.01.2002 ; опубл. 10.08.2003.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

Д. И. Стрекалов

Тамбовский государственный университет, Тамбов, Россия
(e-mail: strekalovdimitry@yandex.ru)

В области неразрушающего контроля металлических конструкций ультразвуковые методы занимают ведущие позиции. Они предоставляют уникальные возможности для обнаружения внутренних дефектов и определения геометрических параметров без повреждения изделий.

Измерение толщины детали осуществляется путем регистрации времени, необходимого ультразвуковому импульсу малой длительности для многократного прохождения через материал [1]. Этот принцип реализован в эхо-импульсном методе, являющемся стандартом ультразвуковой толщинометрии. Сочетание известной скорости распространения ультразвука в материале и измеренного времени прохождения сигнала позволяет с высокой точностью определить толщину стенки. Современные ультразвуковые толщиномеры охватывают диапазон измерений от 0,1 до 1000 мм, работая с материалами, где скорость ультразвука находится в пределах 1500…12 000 м/с [2].

Метод основан на взаимодействии акустических импульсов, генерируемых пьезоэлектрическими или электромагнитно-акустическими преобразователями, с контролируемым объектом. Пьезоэлектрические преобразователи доминируют благодаря своей высокой чувствительности и стабильности. Выбор между совмещенными и раздельно-совмещенными преобразователями зависит от измеряемой толщины, состояния поверхности и материала.

Специфика применения ультразвуковой толщинометрии к корпусам РЭА обусловлена следующими факторами:

1. Малая толщина стенок (0,5…5,0 мм).
2. Разнообразие материалов корпусов (сплавы, стали, композиты).
3. Ограниченный доступ к внутренним поверхностям в смонтированной аппаратуре.
4. Наличие защитных покрытий.
5. Сложная геометрия изделий.

Режим «эхо-эхо» в современных толщиномерах позволяет измерять толщину металла под покрытиями без их предварительной подготовки [3]. Это ключевое преимущество для неразрушающего контроля корпусов РЭА, где удаление защитных слоев недопустимо. Метод основан на измерении интервала между двумя последовательными донными сигналами, что исключает влияние толщины покрытия на результат.

Точность измерений зависит от ряда параметров, включая частоту ультразвука и шероховатость поверхности. Для обеспечения высокой точности необходимо учитывать акустические свойства материала, температуру и кривизну поверхности. Современные приборы оснащены системами автоматической адаптации к условиям поверхности, что расширяет их возможности и повышает достоверность контроля.

Библиографический список

1. Справочник дефектоскописта: Вихретоковый толщиномер. – URL : https://nerkon.ru/poleznoe/spravochnik_defektoskopista/vihretokovii_tolshinomer (дата обращения: 21.02.2026).

2. Вихретоковые толщиномеры покрытий. Дефектоскопист Центр. – URL : https://www.defectoskopist.ru/izmereniyetolshchiny-pokrytiy (дата обращения: 21.02.2026).

3. Выбор параметров вихретокового контроля при оценке глубины дефектов, возникающих в углерод-углеродных композиционных материалах / С. С. Пичугин, С. И. Яковлева, В. В. Кулаков и др. // Труды ВИАМ. – 2025. – № 6. – С. 98 – 109. – URL : http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=2299 (дата обращения: 21.02.2026).

4. Электромагнитный (вихретоковый) контроль: Справочное пособие. – URL : https://helpiks.org/4-71467.html (дата обращения: 21.02.2026).

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА МАГНИТНОГО ТОЛЩИНОМЕРА

Д. И. Стрекалов, А. П. Пудовкин

Тамбовский государственный университет, Тамбов, Россия
(e-mail: strekalovdimitry@yandex.ru; resbn@mail.ru)

Магнитный толщиномер – это неразрушающий инструмент, предназначенный для определения толщины защитных слоев на материалах с ферромагнитными свойствами. Его сфера применения обширна и охватывает такие ключевые отрасли, как машиностроение, нефтегазовая промышленность и строительство. Современные тенденции в развитии магнитных толщиномеров сосредоточены на улучшении точности измерений, автоматизации процесса калибровки и оптимизации анализа полученных данных.

Одним из приоритетных направлений совершенствования является внедрение автоматизированной калибровки. Классический подход к калибровке предполагает использование эталонных пластин с покрытием известной толщины на ферромагнитной подложке. Для достижения максимальной точности требуется калибровка по нескольким эталонам, покрывающим весь диапазон измеряемых толщин. Система автокалибровки позволяет прибору самостоятельно устанавливать зависимость между выходным сигналом и толщиной покрытия, опираясь на два-три измерения на эталонных образцах. Это приводит к построению точной калибровочной кривой, что значительно ускоряет подготовку к работе и повышает достоверность результатов [2].

Интеграция микропроцессоров в измерительный блок открывает возможности для применения продвинутых алгоритмов обработки сигналов. К ним относятся цифровая фильтрация, статистический анализ серий измерений, а также компенсация влияния температурных колебаний и прочих внешних факторов. Микропроцессорный модуль также отвечает за управление режимами работы прибора, обеспечивает интуитивно понятное взаимодействие с пользователем через клавиатуру и дисплей, сохраняет результаты измерений в энергонезависимой памяти и позволяет передавать данные на компьютер посредством интерфейсов RS-232, USB или Bluetooth [1, 3].

Библиографический список

1. Электромагнитные методы и средства неразрушающего контроля / В. Ф. Булгаков, Е. В. Бутенко, А. Е. Гольдштейн, В. К. Жуков // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303, № 6. – С. 95 – 101. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/elektromagnitnye-metody-i-sredstva-nerazrushayuschego-kontrolya (дата обращения: 21.04.2026).
2. Новиков, В. А. Границы применения магнитного метода контроля с использованием визуализирующей поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 2. – С. 89 – 98. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/granitsy-primeneniya-magnitnogo-metoda-kontrolya-s-ispolzovaniem-vizualiziruyuschey-polya-plenki (дата обращения: 21.04.2026).
3. Толщиномеры покрытий магнитные ТМ-МГ4. Описание типа средства измерений // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – 2024. – URL : https://all-pribors.ru/opisanie/59933-15-tm-mg4 (дата обращения: 21.04.2026).
4. Пат. № 22/0058c/RU. Способ непрерывного контроля толщины слоев биметалла с ферромагнитным основанием / Плужников Ю. В., Колмаков А. В., Пудовкин А. П. ; № 2002102151/28 ; заяв. 23.01.2002 ; опубл. 10.08.2003.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ И ГАЛОГЕНИДНЫХ ОПТОВОЛОКОН

А. П. Удалова

Федеральное автономное учреждение
«Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия
(e-mail: era_otd2@mil.ru)

С развитием технологий и увеличением требований к скорости и надежности передачи данных на железных дорогах продолжает возрастать роль волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП), обеспечивающих безопасность и эффективность. При этом наибольшее распространение получили оптоволоконные линии передачи, в которых для изготовления волоконно-оптических кабелей используют кварцевое стекло SiO_2 с легирующими добавками: GeO_2, P_2O_5, TiO_2, Al_2O_3, Sb_2O_3. Данное оптоволокно имеет три окна прозрачности в спектральном диапазоне от 0,8 до 1,7 мкм, наименьшее затухание 0,15…0,2 дБ/км достигнуто на длине волны 1,55 мкм, что является для кварцевого оптоволокна предельным [1 – 4]. В связи с этим целью исследования является поиск новых спектральных диапазонов и новых материалов для изготовления оптических волокон с более низкими, чем у кварца, значениями показателя затухания.

Для смещения границы пропускания в область бóльших длин волн в целях уменьшения рэлеевского рассеяния необходимы материалы с меньшей частотой колебательных переходов за счет тяжелых атомов, входящих в их

состав, и более слабой связи между ними. К таким материалам относятся фторидные ($l_{раб}$ = 2,5…4 мкм) и халькогенидные ($l_{раб}$ = 3,5…6 мкм) стекла, а также кристаллические материалы на основе галогенидов таллия и серебра ($l_{раб}$ = 5,5…10,6 мкм).

Результаты определения параметра S_0 и расчетов коэффициента хроматической дисперсии $D(\lambda)$ и длины регенерационного участка L для указанных материалов представлены в табл. 1.

В таблице 2 представлены сравнительные результаты расчета параметров оптоволокна из новых материалов, в частности, халькогенидных и галогенидных стекол, и оптоволокна из кварца:

– относительного увеличения дальности оптоволоконной передачи $L_{нм}/L_{кв}$, обеспечиваемого оптоволокном из нового материала ($L_{нм}$);

– отношения $\rho_{нм}/\rho_{кв}$ плотности нового материала оптоволокна $\rho_{нм}$ к плотности кварца $\rho_{кв}$;

– отношения $\alpha_{кв}/\alpha_{нм}$ показателя затухания кварца $\alpha_{кв}$ к показателю затухания оптоволокна из нового материала – $\alpha_{нм}$;

– по сравнению с оптоволокном из кварца ($L_{кв}$) для различных оптических стекол.

1. Результаты расчета длины регенерационного участка для различных материалов оптоволокна

Материал оптоволокна	S_0, пс/(нм^2·км)	λ_0, нм	λ, нм	$D(\lambda)$, пс/(нм·км)	L, км
As_2S_3	0,009	4850	5500	4,89	899,4
As_2Se_3	0,009	4850	6000	7,74	568,7
AgCl	0,008	4500	6000	8,20	536,4
KRS-5	0,005	8000	10 000	7,38	596,2
CsI	0,002	9000	15 000	6,53	674,0
Кварц	0,090	1310	1600	19,82	222,0

2. Результаты расчета относительного увеличения дальности оптоволоконного наведения $L_{нм}/L_{кв}$ при ограничении дисперсией

Материал оптоволокна	Плотность ρ, г/см^3	Показатель затухания α, дБ/км	$\rho_{нм}/\rho_{кв}$	$\alpha_{кв}/\alpha_{хкг}$	$L_{нм}/L_{кв}$
Кварц	2,6	0,2	1	1	1
As_2S_3	3,43	0,02	1,32	10	4,05
As_2Se_3	4,75	0,01	1,83	20	2,56
AgCl	5,56	0,002	2,14	100	1,51
KRS-5	7,36	0,0006	2,83	333	2,68
CsI	4,51	0,00003	1,73	6666	1,25

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

– наименьшим затуханием обладают галогенидные стекла: CsI (~10^{-5} дБ/км), KRS-5 (~10^{-4}дБ/км) и AgCl (~10^{-3}дБ/км);

– наибольшей длиной волны, соответствующей нулевой дисперсии, обладает стекло из CsI;

– наименьшими производными $\Delta D/\Delta\lambda$ (S_0) обладают стекла из CsI, KRS-5 и AgCl.

Полученные результаты показывают большие потенциальные возможности халькогенидных и галогенидных стекол для существенного увеличения дальности оптоволоконной связи по ВОСП, прокладываемым вдоль высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Дальнейшие исследования направлены на определение перспектив развития лазерных излучателей для магистральных и локальных ВОСП и для высокоскоростного железнодорожного транспорта и согласование их с новыми видами оптоволокна, а также выработка рекомендаций по повышению эффективности использования ВОСП в магистральных и бортовых системах высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Библиографический список

1. Чехлатый, Н. А. Волоконно-оптические системы передачи информации на железнодорожном транспорте / Н. А. Чехлатый, Т. Н. Паларамчук // Сб. науч. тр. ДОНИЖТ. – 2024. – № 2(73). – С. 17 – 31.

2. Салифов, И. И. Расчет и сравнение сред передачи современных магистральных сетей связи по критерию латентности (задержки) / И. И. Салифов // T-Comm. – 2009. – № 9. – С. 42 – 45.

3. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2007. – 514 с.

4. Ларин, Ю. Т. Стекла для изготовления оптических волокон и кабелей. – АО «ВНИИ КП» [Электронный ресурс] / Ю. Т. Ларин. – Портал «Радиоэлектроника и телекоммуникации». – URL : www.infomost, www.hieperline, www.lean/theorya-prakt (дата обращения: 15.01.2026).

Работа выполнена при поддержке ОАО «РЖД» в рамках гранта по договору № 6453328 от 17 февраля 2026 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАГРЕВА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

И. С. Федосеенко

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач промышленной автоматизации является повышение энергоэффективности тепловых аппаратов. Существенная часть электрической энергии расходуется промышленными электропечами, работающими в условиях переменных тепловых нагрузок и переходных режимов нагрева.

Для повышения эффективности управления необходимо применение энергосберегающих алгоритмов регулирования температуры рабочей камеры. Использование математических моделей позволяет исследовать динамику тепловых процессов без проведения дорогостоящих экспериментов на реальном оборудовании.

Для описания тепловых процессов использовано уравнение теплового баланса:

$$Q = cm\Delta T, \tag{1}$$

где Q – количество теплоты; c – удельная теплоемкость материала; m – масса нагреваемого объекта; ΔT – изменение температуры.

Для анализа динамики системы применено дифференциальное уравнение изменения температуры рабочей камеры:

$$C\frac{dT}{dt} = P - k(T - T_0), \tag{2}$$

где C – теплоемкость системы; P – мощность нагревателей; k – коэффициент тепловых потерь; T – температура рабочей камеры; T_0 – температура окружающей среды.

Применение оптимального алгоритма управления позволяет уменьшить время выхода системы на рабочий режим и снизить энергопотребление.

Таким образом, использование энергосберегающих методов управления промышленными электропечами позволяет повысить эффективность тепловых процессов и уменьшить эксплуатационные затраты предприятия.

Библиографический список

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники : учебник для студентов вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., пер. и доп. – М. : Высшая школа, 1996. – 701 с.

2. Кацман, М. М. Электрические машины и электропривод : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. – 12-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.

3. Белоусов, О. А. Энергосберегающее управление группой мощных аппаратов с электронагревом / О. А. Белоусов, Н. А. Кольтюков, Ю. Т. Зырянов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 5. – С. 27 – 29.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЬЮ

И. С. Федосеенко, Н. А. Кольтюков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

Одной из основных задач автоматизации тепловых процессов является обеспечение устойчивости системы управления при изменении параметров объекта и внешних воздействий.

Для регулирования температуры промышленной электропечи используется ПИД-регулятор, обеспечивающий автоматическое поддержание заданного температурного режима.

Математическая модель ПИД-регулятора имеет вид

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)\, d_t + K_d de(t) / d_t, \quad (1)$$

где K_p, K_i, K_d – коэффициенты регулятора; $e(t)$ – ошибка регулирования температуры.

Пропорциональная составляющая обеспечивает реакцию системы на текущую ошибку регулирования, интегральная уменьшает статическую ошибку, а дифференциальная повышает быстродействие системы и уменьшает колебания температуры.

Для исследования переходных процессов используется передаточная функция объекта управления:

$$W(s) = K/(T_s + 1), \quad (2)$$

где K – коэффициент передачи системы; T – постоянная времени объекта управления.

Полученные результаты моделирования показывают, что применение оптимизированного ПИД-регулятора позволяет уменьшить перерегулирование температуры и повысить устойчивость системы управления.

Библиографический список

1. Болтон, У. Системы автоматического управления / У. Болтон. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 768 с.

2. Ким, Д. П. Теория автоматического управления / Д. П. Ким. – М. : Физматлит, 2010. – 312 с.

3. Федоров, А. В. Промышленные электрические печи / А. В. Федоров. – М. : Энергия, 1980. – 416 с.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧЬЮ

И. С. Федосеенко, Н. А. Кольтюков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: resbn@mail.ru)

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам повышения энергоэффективности промышленных тепловых аппаратов. Особую актуальность данная задача приобретает для электропечей сопротивления, используемых в радиотехнической промышленности.

Основной проблемой существующих систем управления является наличие тепловой инерции, приводящей к возникновению переходных процессов, перегреву рабочей камеры и перерасходу электрической энергии. Для уменьшения энергопотребления необходимо применение оптимальных алгоритмов управления температурным режимом.

Для описания динамики тепловых процессов использована математическая модель теплового баланса:

$$C\frac{\Delta T}{\Delta t} = P - k(T - T_0), \qquad (1)$$

где C – теплоемкость системы; P – мощность нагревателей; k – коэффициент тепловых потерь; T – температура рабочей камеры; T_0 – температура окружающей среды.

Для повышения эффективности регулирования предложен импульсный способ управления мощностью нагревательных элементов. Регулирование осуществляется путем изменения амплитуды и длительности управляющих импульсов. Переходный процесс нагрева электропечи предоставлен на рис. 1.

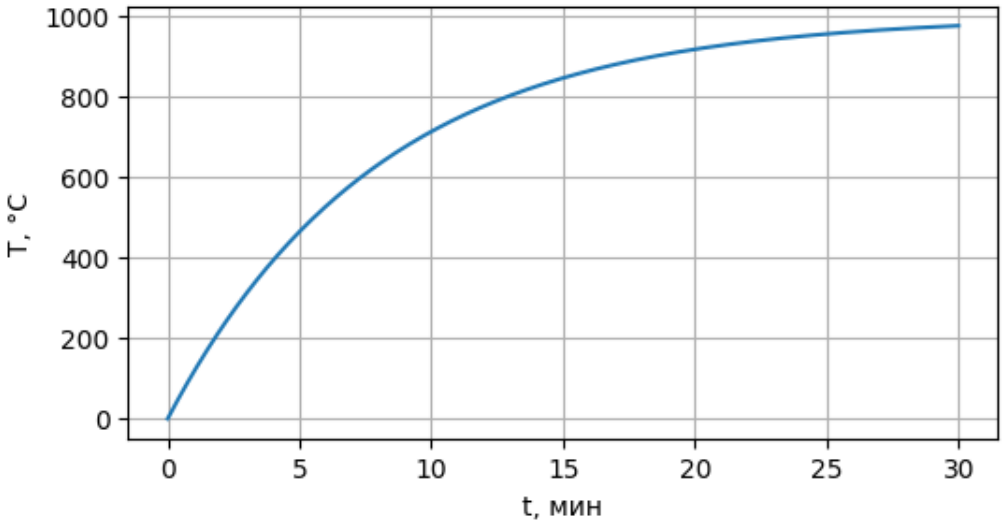


Рис. 1. Переходный процесс нагрева электропечи

Анализ результатов моделирования показал уменьшение времени выхода на рабочий режим и снижение перерегулирования температуры.

Библиографический список

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники : учебник для студентов вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., пер. и доп. – М. : Высшая школа, 1996. – 701 с.
2. Острейковский, В. А. Теория автоматического управления : учебное пособие для вузов / В. А. Острейковский. – М. : Высшая школа, 2005. – 326 с.
3. Белоусов, О. А. Энергосберегающее управление группой мощных аппаратов с электронагревом / О. А. Белоусов, Н. А. Кольтюков, Ю. Т. Зырянов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 5. – С. 27 – 29.

БАЛЛАСТИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

А. Е. Хрипченко

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: hripchenko.513313@yandex.ru)

Балластирование резонатора лазерного гироскопа – необходимость, обусловленная реактивной составляющей газа внутри резонатора лазерного гироскопа, а точнее, отрицательным дифференциальным сопротивлением. При ионизации газа в трубке возникает плазма, в связи с чем сопротивление газа резко падает, и ток быстро растет, ионизируя большее количество газа, вызывая лавинообразный процесс. Ток будет расти бесконтрольно до выхода из строя источника питания или выгорания электродов. Балластный резистор ограничивает максимальный ток, исключая его лавинообразное возрастание и линейность работы элемента [1, с. 5].

Данное явление описывается уравнением Таунсенда, описывающего ток, создаваемый квазистационарным электрическим разрядом в газе [2, с. 74].

Воспользуемся уравнением переносного коэффициента ударной ионизации α (коэффициент Таунсенда), который показывает число новых электронов, рожденных одним электроном на единицу пути вдоль направления электрического поля E:

$$dq = q\alpha,\ dx, \tag{1}$$

где dq – число электронов, образующихся на участке пути; q – начальное количество электронов (в данном слое газа); α – коэффициент Таунсенда (зависит от рода газа, давления и напряженности поля).

Решая это уравнение от катода ($x = 0$) до анода ($x = d$), получаем закон экспоненциального роста электронных лавин (2) [3, с. 35]:

$$q = q_0 e^{\alpha d}, \tag{2}$$

где q_0 – количество начальных электронов; d – расстояние между электродами.

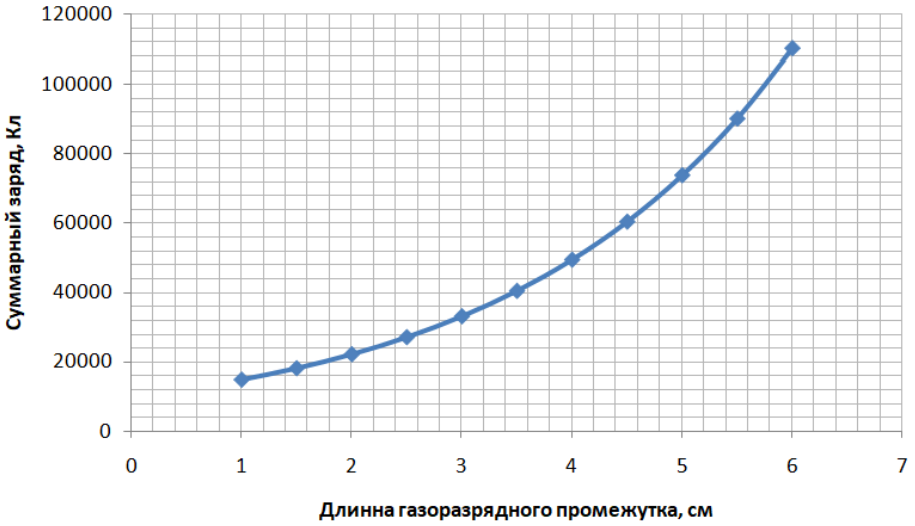


Рис. 1. График лавинообразного нарастания тока, рассчитанное по формуле (2)

Лавинообразное нарастание тока в газовом разряде (газоразрядном промежутке) описывается экспонентой и при фиксированном α будет выглядеть как классическая экспонента. При приблизительном расчете газовой трубки длиной 5 см и заполнением гелий-неоновой смесью в пропорции 5 к 1 (He-Ne) (рис. 1).

Библиографический список

1. Вакуленко, В. М. Источники питания лазеров : монография / В. М. Вакуленко, Л. П. Иванов. – Сов. Радио, 1980. – 104 с.

2. Козин, Г. И. Основы теории колебаний для физики лазеров : учебное пособие / Г. И. Козин ; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – М. : МИФИ, 2018. – 150 с.

3. Пудовкин, А. П. Основы теории цепей : учебное пособие / А. П. Пудовкин, Т. И. Чернышова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 79 с.

ЛАЗЕРНЫЕ ГИРОСКОПЫ И ИХ ПУТИ РАЗВИТИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ

А. Е. Хрипченко

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: hripchenko.513313@yandex.ru)

Гироскоп – это устройство, которое способно определять изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено.

В основе работы лазерного гироскопа – эффект Саньяка. Простыми словами его суть можно объяснить так – время прохождения светового луча по замкнутому контуру зависит от того, неподвижен или вращается данный контур, а также от направления его вращения [1, с. 32].

Современные лазерные гироскопы разделяются по способу создания так называемой частотной подставки на три основных типа – вибрационные, фарадеевские и зеемановские. Последние обладают рядом преимуществ: монолитность конструкции без подвижных частей, наличие гибкой электронно-управляемой магнитооптической частотной подставки, возможность использования четырехволнового режима генерации лазера. Благодаря этому зеемановские лазерные гироскопы применяются в сложных условиях, при высоком уровне воздействия внешних факторов [2, с. 16].

На данный момент существуют следующие возможные направления дальнейшего конструкционного усовершенствования кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ):

1. Расширение круга материалов, используемых при изготовлении резонаторов КЛГ. Примером такого подхода могут служить уже давно применяемые модульные схемы резонаторов из стеклокерамики и металлических сплавов, что позволило расширить диапазон применения КЛГ за счет увеличения устойчивости к перегрузкам и температурным воздействиям. Еще одним материалом для резонаторов КЛГ в будущем могут стать углеродные композитные соединения.
2. Возможный переход при конструировании КЛГ с устаревающих газоразрядных He-Ne лазеров на более современные полупроводниковые лазерные диоды (ПЛД) с открытыми оптическими каналами в моноблочном резонаторе на основе интерферометра Фабри-Перо.
3. Создание программы «интеллектуального» ошумливания лазерного гироскопа, путем изменения амплитуды колебаний виброподвеса, для сужения зоны захвата (зоны нечувствительности) [3, с. 75].

Библиографический список

1. Вакуленко, В. М. Источники питания лазеров : монография / В. М. Вакуленко, Л. П. Иванов. – М. : Сов. Радио, 1980. – 104 с.
2. Юльметова, О. С. Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов : учебное пособие / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, И. Б. Челпанов ; под ред. В. А. Валетова. – СПб. : Университет ИТМО, 2017. – 131 с.
3. Козин, Г. И. Основы теории колебаний для физики лазеров : учебное пособие / Г. И. Козин ; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – М. : МИФИ, 2018. – 150 с.

ПРОБЛЕМА БАЛЛАСТИРОВАНИЯ ГОЗОВЫХ He-Ne ЛАЗЕРОВ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

А. Е. Хрипченко

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: hripchenko.513313@yandex.ru)

Газовые лазеры, несмотря на свою сложность, по сравнению с полупроводниковыми лазерами, обладают рядом преимуществ, таких как надежность и стабильность. Но у этих устройств есть один весомый недостаток – сложность и массивность конструкции. Одной из причин увеличения габаритов лазера является балластирование непосредственно на его корпусе [1, с. 5].

Так как ток в газоразрядном промежутке возрастает, его сопротивление тоже уменьшается нелинейно. Это реактивное свойство вкупе с емкостью питающего кабеля образует RC генератор релаксационных колебаний. Рассмотрим принцип его работы (рис. 1).

Элементы C1 и C2 являются эквивалентами емкости, образуемой питающим кабелем газовой трубки.

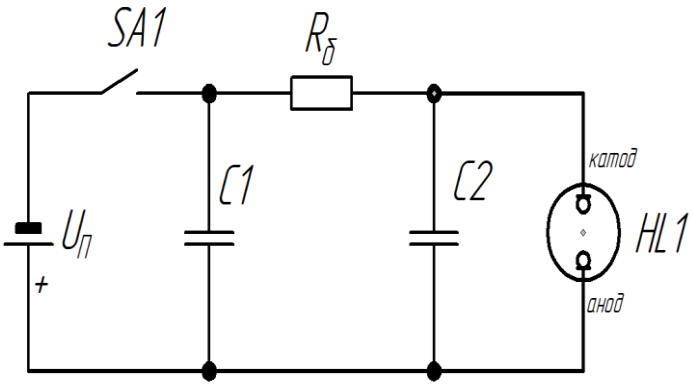


Рис. 1. Схема подключения газовой трубки

Предположим, что балластный резистор расположен далеко от газовой трубки, (C1 << C2). В таком случае, при замыкании ключа SA1 в первый момент времени через $R_б$ начинает заряжаться емкость кабеля C2. Одновременно с этим на электродах трубки возрастет потенциал, до напряжения ионизации ($U_{ион}$) газа в трубке (рис. 2). Сопротивление газа в лазере начинает нелинейно уменьшаться и происходит ионизация газа в HL1, что заставляет разрядиться емкость кабеля, отдав энергию лампе, потенциал которой уменьшается до напряжения гашения ($U_г$). Ионизация газа прекратится, и его сопротивление вновь вырастет. Далее цикл повторяется вновь (рис. 2).

Предположим, что емкость кабеля до балласта больше, чем емкость после, а емкость кабеля после балласта крайне мала (C1 >> C2; C2 ≈ 0). В таком случае после замыкания ключа SA1 сначала заряжается емкость C1.

По окончании заряда C1 начинает заряжаться емкость C2 и возрастает напряжение на электродах лазера. При напряжении ионизации ($U_{ион}$) емкость кабеля после балласта также разряжается, но ее влияние не вызывает резкого увеличения тока трубки HL1.

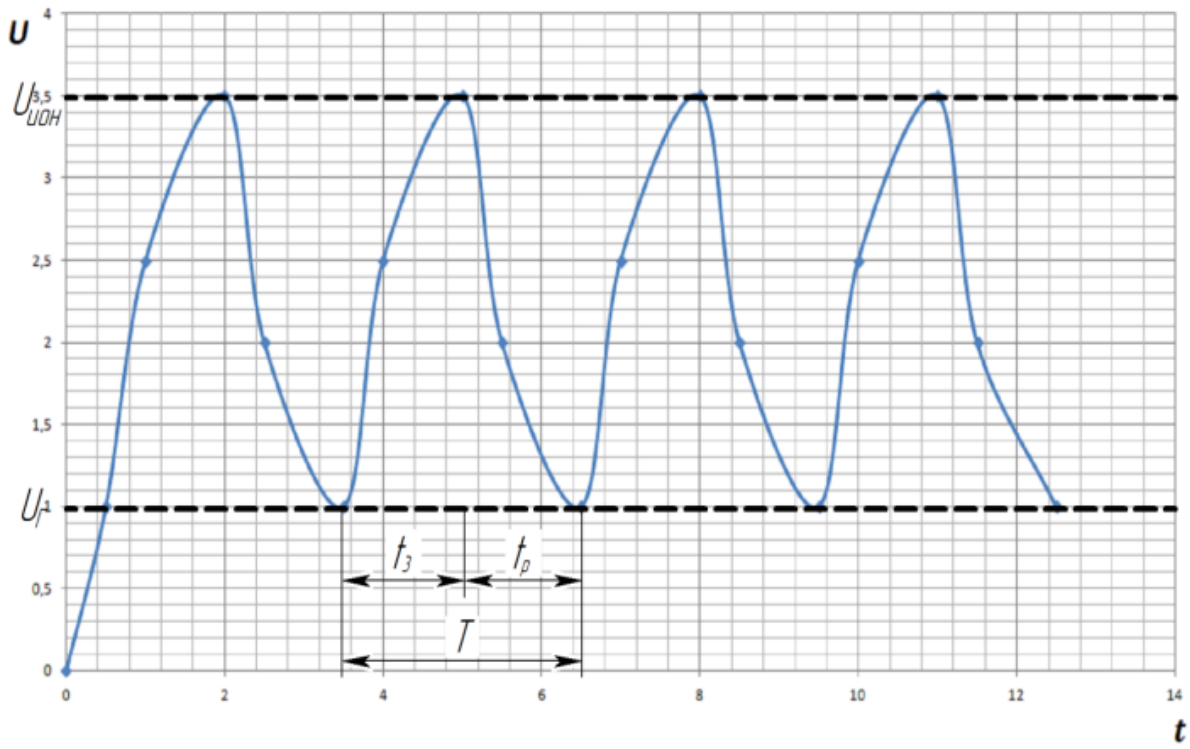


Рис. 2. График заряда емкости кабеля после балласта при отдаленном расположении резистивного элемента

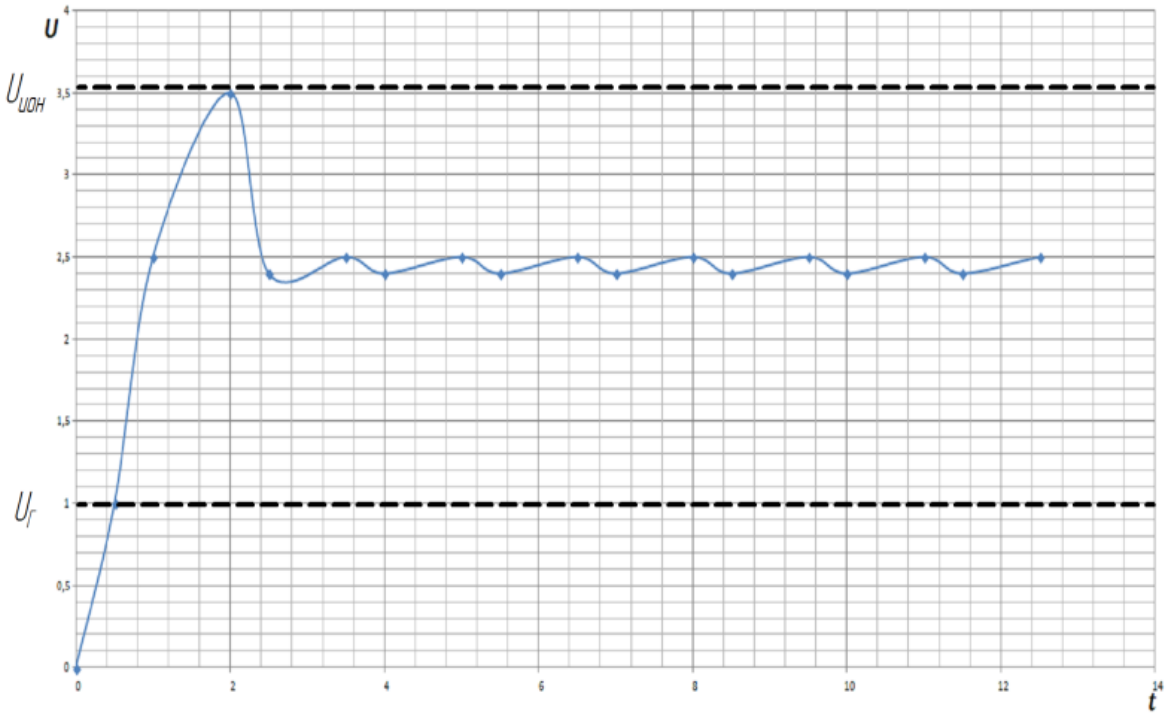


Рис. 3. График заряда емкости кабеля после балласта при близком расположении резистивного элемента

Решением по модернизации конструкции может стать изготовление анодов из металлических сплавов с высоким удельным сопротивлением с последующим напылением адгезионного и антикоррозионного покрытия для обеспечения устойчивости к окислению

Библиографический список

1. Вакуленко, В. М. Источники питания лазеров : монография / В. М. Вакуленко, Л. П. Иванов. – М. : Сов. Радио, 1980. – 104 с.
2. Пудовкин, А. П. Основы теории цепей : учебное пособие / А. П. Пудовкин, Т. И. Чернышова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 79 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИРАБОТКИ РЕЗОНАТОРА КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

А. Е. Хрипченко А. П. Пудовкин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: hripchenko.513313@yandex.ru; resbn@mail.ru)

Принцип действия кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ), являющегося разновидностью оптических гироскопов, базируется на физическом эффекте Саньяка. Для регистрации вращения через разностный частотный сигнал требуется замкнутый путь для встречно распространяющихся лазерных волн, обеспечиваемый оптическим резонатором [1, с. 16].

В процессе изготовления резонаторов осуществляются специфические процессы прожига и приработки резонаторов. Эти качественно выполненные процессы позволяют в разы увеличить надежность и точность КЛГ.

После механической обработки материала, из которого был изготовлен резонатор, следует этап подготовки электровакуумной обработки резонатора [1, с. 75]. На диэлектрический резонатор прикрепляют штенгель, который будет выполнять роль одного из катодов (анодов), и оставшийся катод и анод.

Затем резонатор устанавливают в вакуумную камеру, после чего изделие нагревают для испарения остатков влаги из каналов и создают вакуум внутри и снаружи для удаления атмосферных газов.

Далее в изделие поступает кислород, при давлении от 5 до 10 Па, так как для обеспечения тлеющего разряда необходимо именно пониженное давление газа. После чего ионизируют закачанный газ. Данный процесс называется прожигом резонатора и проводится для удаления частиц органики, попавшей в резонатор совместно с атмосферным воздухом.

По окончании прожига кислородом закачивается рабочая смесь, He-Ne или иная, в зависимости от типа лазера. Начинается новый этап – приработка резонатора КЛГ.

Приработка резонатора чувствительного элемента позволяет уменьшить анизотропию. При первоначальном интенсивном воздействии излучения, происходит выравнивание оптических свойств поверхностей. Сглаживаются микронеоднородности, уменьшаются локальные напряжения в покрытии, что приводит к снижению общей анизотропии резонатора. Это, в свою очередь, способствует уменьшению дрейфа [2, с. 43].

Также приработка, по мере деградации зеркал, стабилизирует их коэффициент отражения, что положительно влияет на ширину зоны захвата. Стабилизация коэффициента отражения и уменьшение потерь на рассеяние приводит к увеличению добротности резонатора, что способствует сужению зоны захвата [3, с. 184].

Качество приработки можно оценить при помощи вычисления ширины зоны захвата КЛГ по следующей формуле:

$$\Omega_{\text{захв}} = \frac{c\lambda}{4S}\Delta R(t), \quad (1)$$

где $\Delta R(t) = \left| R_1(t) - R_2(t) \right|$ – разность коэффициента отражения зеркал; S – площадь зеркала; c – скорость света в вакууме; λ – длина излучаемой волны.

Библиографический список

1. Юльметова, О. С. Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов : учебное пособие / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, И. Б. Челпанов ; под ред. В. А. Валетова. – СПб. : Университет ИТМО, 2017. – 131 с.

2. Козин, Г. И. Основы теории колебаний для физики лазеров : учебное пособие / Г. И. Козин ; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – М. : МИФИ, 2018. – 150 с.

3. Svelto, O. Principles of Lasers / O. Svelto. – 4th ed. – Boston, MA : Springer US, 1998. – 535 p.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Т. Ш. Шералиев, Я. Р. Котенко, Я. С. Дронин

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: Sheraliev.ts@dvfu.ru; Kotenko.yr@dvfu.ru; Dronin.ias@dvfu.ru)

Актуальность исследований терагерцового диапазона обусловлена широким спектром применения как в задачах связи, зондирования, так и в области пищевой промышленности и биомедицины. Особое внимание следует уделить метаматериалам – композитным материалам, обладающим отрицательной магнитной или диэлектрической проницаемостями (или одновременно обеими). Данная статья представляет собой обзор современных решений в области метаматериалов субмиллиметровых волн.

В работе [1] авторы представляют моделирование структур на основе диоксида ванадия и приводят характеристики поглощения материалов на различ-

ных частотах для разных конструкций крестообразного профиля. В статье представлен алгоритм изготовления соответствующего моделированию устройства, представляющего собой широкополосный поглотитель в диапазоне 1,235…2,472 ТГц. В данном диапазоне эффект поглощения оценивается в 99%, если обратить внимание на поглощение на уровне 90%, полоса пропускания становится равной 1,868 ТГц. Описан эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности, при использовании VO_2 посредством трехатомной системы и описания энергетических уровней для электронов в атоме.

Zhang H с соавторами [2] представляют гибридную структуру на основе метаматериала, дисульфида рения (ReS_2) и перовскита $FAPbI_3$, предназначенную для оптического управления терагерцовым излучением. В статье описан алгоритм изготовления устройства и приведены результаты его экспериментальной характеризации. Устройство демонстрирует два режима работы в зависимости от мощности накачки: при малых и средних уровнях мощности оно функционирует как узкополосный частотно-селективный модулятор, а при высокой мощности накачки переходит в режим широкополосного аттенюатора. Максимальная глубина модуляции достигает 99,8% на резонансной частоте 0,91 ТГц при плотности мощности накачки 1500 мВт/см². Авторы показывают, что столь высокие характеристики обусловлены формированием двойной гетероструктуры типа II ($ReS_2/FAPbI_3$ и $FAPbI_3/Si$), которая способствует эффективному разделению фотогенерированных носителей заряда, а также использованием метаматериала, усиливающего взаимодействие света с веществом на резонансной частоте. Описана высокая экологическая стабильность устройства: после шести месяцев хранения при относительной влажности 60% и температуре 25 °C оно сохраняет более 95% исходной глубины модуляции благодаря защитному слою ReS_2, предотвращающему деградацию перовскита.

В статье [3] методом конечных разностей во временной области (FDTD) проведено моделирование трех типов метаматериальных структур на основе двойных разрезных колец (DSRM) с углами поворота внутреннего резонатора 0, 45 и 90°, обозначенных как DSRM-1, DSRM-2 и DSRM-3 соответственно. Исследованы их электродинамические характеристики в терагерцовом диапазоне частот (0,5…1,3 ТГц). Все три конфигурации демонстрируют эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности (EIT), возникающий вследствие интерференционной связи между яркими модами внутреннего и внешнего разрезных колец.

Библиографический список

1. Dual-Mode terahertz modulator based on $ReS_2/FAPbI_3$/Metamaterial hybrid structure with large modulation depth and high environmental stability / B. Sun, Q. Geng, X. He, et al. – Infrared Physics and Technology. – 2026. – V. 155. – P. 106518.

2. Bifunctional terahertz metamaterial device based on Vanadium dioxide with switchable EIT-like effect and broadband absorption mode / H. Zhang, D. Zhao, Y. Wang, et al. – Physica B: Condensed Matter. – 2026. – V. 700. – P. 416864.

3. Zhu, Y. Electromagnetically induced transparent terahertz dual-split-ring metamaterial for ultra-high sensitivity sensor applications / Y. Zhu, D. Zheng, Y.-S. Lin. – Sensors and Actuators Reports. – 2025. – V. 10. – P. 100374.

ОЦЕНКА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УГЛОМЕРНОГО КАНАЛА СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ

Н. В. Ширяева

Тамбовский государственный технический университет Россия, Тамбов
(e-mail: natasha.0.06@mail.ru)

Применение метода оптимальной фильтрации в системах со случайной структурой позволяет определить весовые коэффициенты для двух моделей движения воздушного судна при вторичной обработке информации [1, 2]

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^{2} W_k^{(j)} \hat{x}_k^{(j)} = \frac{\sum_{j=1}^{2} t(j)(2\pi A_k^{(j)})^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{(v_k^{(j)})^2}{2A_k^{(j)}}\right\}\left(1-W_{k-1}^{(j)}\right)\hat{x}_k^{(j)}}{\sum_{j=1}^{2} t(j)(2\pi A_k^{(j)})^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{(v_k^{(j)})^2}{2A_k^{(j)}}\right\}\left(1-W_{k-1}^{(j)}\right)}, \qquad (1)$$

где $\hat{x}_k$ – оцененное значение параметра движения ВС методом оптимальной фильтрации; $\hat{x}_k^{(j)}$ – значение частных оценок параметра движения воздушного судна; $j = 1, 2$ – условия, определяемые различными моделями движения воздушного судна; $W_k^{(j)}$ – значения апостериорных вероятностей номеров структур системы (веса частных оценок) с учетом различных оценок параметра движения воздушного судна; $t(j)$ – интервал времени, определяющий использование той или иной модели движения ВС; $A_k^{(j)}$ – значение дисперсии невязки системы; $v_k^{(j)}$ – значение невязки системы.

По условиям моделирования двух моделей состояния угломерного канала со случайной структурой используется одна РЛС, поэтому параметр $t(j)$ не требуется при вычислении.

Основное условие определения весовых коэффициентов при обработке радиолокационной информации угломерного канала описывается выражением

$$W_1(k) + W(k) = 1. \qquad (2)$$

С учетом выражений (1) и (2) оценка угла места при использовании двух моделей состояния, полученная от РЛС, примет следующий вид [1, 3, 4]:

$$\varphi_{во}(k+1)=\frac{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в1}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}\varphi_{во1}(k+1)}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в1}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}+\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1))}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в2}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}}+$$
$$+\frac{\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в2}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}\varphi_{во2}(k+1)}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в1}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}+\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в2}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}};\quad(3)$$

$$W_1(k+1)=\frac{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в1}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в1}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}+\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в2}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}};\quad(4)$$

$$W_2(k+1)=\frac{\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в2}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}}{\frac{(1-W_1(k))}{\sqrt{2\pi D_1(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в1}(k+1))^2}{2D_1(k+1)}\right\}+\frac{(1-W_2(k))}{\sqrt{2\pi D_2(k+1)}}\exp\left\{-\frac{(\Delta\varphi_{в2}(k+1))^2}{2D_2(k+1)}\right\}};\quad(5)$$

$$\Delta\varphi_{в1}(k+1)=\varphi_{ви}(k+1)-\varphi_{вэ1}(k+1);\quad(6)$$

$$\Delta\varphi_{в2}(k+1)=\varphi_{ви}(k+1)-\varphi_{вэ2}(k+1);\quad(7)$$

$$D_1(k+1)=H_1P_{о1}(k+1)H_1^{т}+R_1(k+1);\quad(8)$$

$$D_2(k+1)=H_2P_{о2}(k+1)H_2^{т}+R_2(k+1);\quad(9)$$

$$R_1(k+1)=\Delta\varphi_{в1}^2(k+1)-H_1P_{э1}(k+1)H_1^{т};\quad(10)$$

$$R_2(k+1)=\Delta\varphi_{в2}^2(k+1)-H_2P_{э2}(k+1)H_2^{т},\quad(11)$$

где $D_1(k)$ и $D_2(k)$ – дисперсии невязки; $\Delta\varphi_{в1}(k)$ и $\Delta\varphi_{в2}(k)$ – значение невязок; $\varphi_{ви}(k)$ – измеренное значение угла места; $\varphi_{вэ1}(k)$ и $\varphi_{вэ2}(k)$ – экстраполированные значения угла места; H_1 и H_2– матрицы наблюдения; $P_{э1}(k)$ и $P_{э2}(k)$ – апостериорные ковариационные матрицы ошибок фильтрации; $R_1(k)$ и $R_2(k)$ – дисперсии шумов измерений; $P_{1о}(k)$ и $P_{2э}(k)$– прогнозируемые значения ковариационной матрицы ошибок вектора состояния двух моделей; $P_э(k)$ – апостериорная ковариационная матрица дисперсии ошибок фильтрации; $P_{о1}(k)$ и $P_{о2}(k)$ – априорные ковариационные матрицы дисперсии ошибок фильтрации.

Библиографический список

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.

2. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

3. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.

4. Indication of relative motion intensity of aerodynamic object and meters with different physical nature / S. N. Danilov, S. P. Moskvitin, Yu. N. Panasyuk, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

АЛГОРИТМ УГЛОМЕРНОГО КАНАЛА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ ДВУХ ФИЛЬТРОВ

Н. В. Ширяева, Ю. Н. Панасюк

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: natasha.0.06@mail.ru)

Для разработки математической модели угломерного канала в вертикальной плоскости радиолокационной станции (РЛС) со случайной структурой двух фильтров при сопровождении воздушных судов (ВС) используем трехмерную и двухмерную модели состояния [1, 2]:

$$\left.\begin{aligned} \varphi_{в1}(k) &= \varphi_{в1}(k-1) + \omega_{в1}(k-1)\tau + 0{,}5\beta_{в1}(k-1)\tau^2; \\ \omega_{в1}(k) &= \omega_{в1}(k-1) + \beta_{в1}(k-1)\tau; \\ \beta_{в1}(k) &= (1-\alpha_ф\tau)\beta_{в1}(k-1) + \xi_a(k-1); \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} \omega_{в2}(k) &= (1-\alpha_ф\tau)\omega_{в2}(k-1) + \xi_v(k-1). \\ \omega_{в1}(k) &= \omega\beta_{в1}(k) = (1-\alpha_ф\tau)\beta_{в1}(k-1) + \xi_a(k-1). \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Модель наблюдения (измерения) системы угломерного канала

$$\varphi_{ви}(k) = \varphi_в(k) + \xi_и(k), \quad (3)$$

где $\xi_и$ – шумы измерения; $\varphi_в(k)$ – истинное значение угла места.

Модель системы со случайной структурой для совместной оценки угла места ВС при использовании двух моделей имеет вид [1, 2]

$$\varphi_{\text{в}}(k) = \sum_{m=1}^{2} W_m(k-1)\,\varphi_{\text{в}m}(k-1),\ \ m=1,2;\ \ \ k=1,2\,,\ ...,\qquad (4)$$

где W_m – весовые коэффициенты оценок фильтрации 1 и 2 фильтров.

Используя модели состояния (1) и (2), модель наблюдения (3), модель системы со случайной структурой (4) и учитывая выражения калмановской фильтрации [3, 4], получен алгоритм угломерного канала со случайной структурой:

$$\varphi_{\text{ов1}}(k+1) = \varphi_{\text{эв1}}(k+1) + K_{\text{фв11}}\Delta\varphi(k+1); \qquad (5)$$

$$\omega_{\text{ов1}}(k+1) = \omega_{\text{эв1}}(k+1) + K_{\text{фв12}}\Delta\varphi(k+1); \qquad (6)$$

$$\beta_{\text{ов1}}(k+1) = \beta_{\text{эв1}}(k+1) + K_{\text{фв13}}\Delta\varphi(k+1); \qquad (7)$$

$$\varphi_{\text{эв1}}(k+1) = \varphi_{\varphi_{\text{ов1}}}(k) + \omega_{\text{ов1}}(k)\tau + 0{,}5\beta_{\text{ов1}}(k)\tau^2; \qquad (8)$$

$$\omega_{\text{эв1}}(k+1) = \omega_{\text{ов1}}(k) + \beta_{\text{ов1}}(k)\tau; \qquad (9)$$

$$\beta_{\text{эв1}}(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}}\tau)\beta_{\text{ов1}}(k); \qquad (10)$$

$$\Delta\varphi_{\text{в1}}(k+1) = \varphi_{\text{и}}(k+1) - \varphi_{\text{эв1}}(k+1). \qquad (11)$$

$$\varphi_{\text{ов2}}(k+1) = \varphi_{\text{эв2}}(k+1) + K_{\text{фв21}}\Delta\varphi(k+1); \qquad (12)$$

$$\omega_{\text{ов2}}(k+1) = \omega_{\text{эв2}}(k+1) + K_{\text{фв22}}\Delta\varphi(k+1); \qquad (13)$$

$$\varphi_{\text{эв2}}(k+1) = \varphi_{\varphi_{\text{ов1}}}(k) + \omega_{\text{ов1}}(k)\tau; \qquad (14)$$

$$\omega_{\text{эв2}}(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}}\tau)\omega_{\text{ов2}}(k); \qquad (15)$$

$$\Delta\varphi_{\text{в2}}(k+1) = \varphi_{\text{и}}(k+1) - \varphi_{\text{эв2}}(k+1); \qquad (16)$$

$$\varphi_{\text{во}}(k+1) = W_1(k)\varphi_{\text{ов1}}(k) + W_2(k)\varphi_{\text{ов2}}(k), \quad W_1(k) + W_2(k) = 1. \qquad (17)$$

Проведено имитационное моделирование по алгоритму (5) – (17).

Результаты моделирования представлены на рис. 1, где показана зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) угла места от времени:

1. В угломерном канале по углу места использовалась двумерная модель состояния фильтра (фильтр 1).

2. В угломерном канале по углу места использовалась трехмерная модель фильтра состояния (фильтр 2).

3. В угломерном канале по углу места использовалась совместная обработка информации от фильтра 1 и фильтра 2.

Таким образом, использование двух фильтров со случайной структурой угломерного канала в вертикальной плоскости позволяет повысить точность оценки угла места траекторной обработки информации от воздушных судов на всех этапах маневра «большая коробочка».

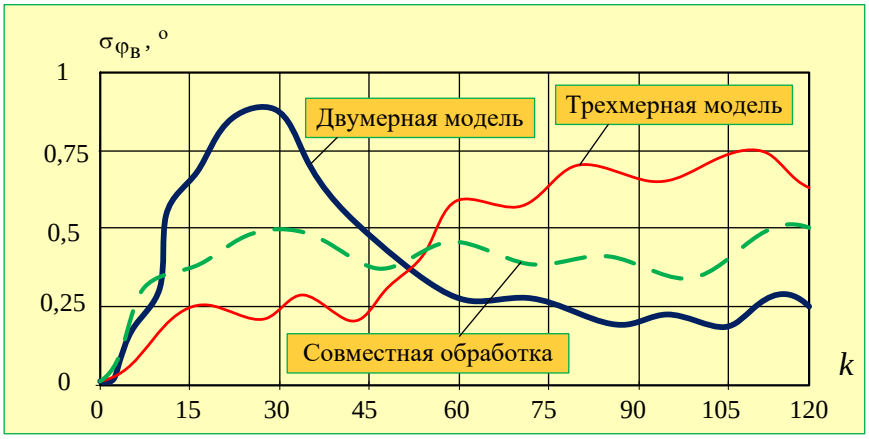


Рис. 1. Зависимости СКО угла места от времени

Библиографический список

1. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.

2. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

3. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 55 – 59.

4. Indication of relative motion intensity of aerodynamic object and meters with different physical nature / S. N. Danilov, S. P. Moskvitin, Yu. N. Panasyuk, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФАЗОВОГО УГЛОМЕРА НА МАЛЫХ ДАЛЬНОСТЯХ

А. Н. Шитов, Д. П. Шпилёв, Р. А. Беглыминов, С. Н. Данилов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: sashashitov70@gmail.com; dimkashpi1@gmail.com;
beglyaminov.1.1.1@mail.ru; plabz@mail.ru)

На практике возможна необходимость работы фазового пеленгатора на малых расстояниях (десятки-сотни метров) – аэродром, ограниченная заводская территория с перемещением транспорта и т.п. [1].

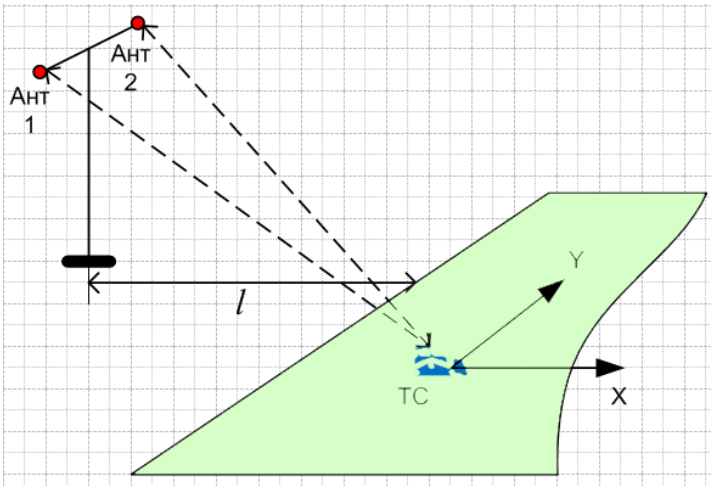
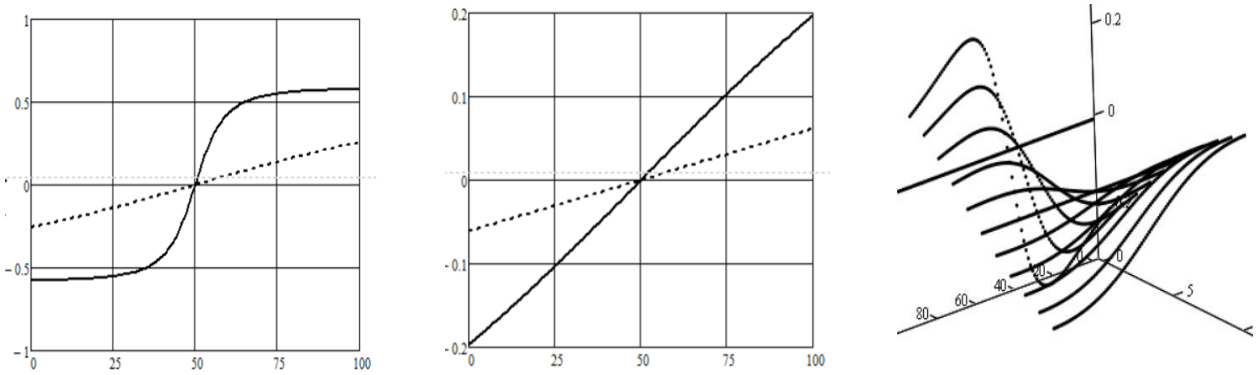


Рис. 1

На рисунке 1 показаны две антенны $Ант_1$ и $Ант_2$, пеленгуемый объект – транспортное средство (ТС) – перемещающийся по контролируемой территории. В результате моделирования было установлено, что в зависимости от величины расстояния l (весь диапазон изменения 9…30 м) пеленгационная характеристика имеет вид, показанный на рис. 2. Пунктирная кривая соответствует l = 1 м, сплошная – 11 м (рис. 2, *а*). Высота подъема антенн в пределах 0,1…10 м влияет на форму дискриминационной характеристики незначительно. Резкое изменение начинается только при расстоянии свыше l = 50 м (рис. 2, *б*).



а) *б*) *в*)

Рис. 2

Здесь сказывается то, что при таких расстояниях начинает существенно увеличиваться наклонное расстояние «антенная система – ТС». На рисунке 2, *в* показано изменение формы дискриминационных характеристик в зависимости от величины l. Так как при этом наклонное расстояние «антенная система – ТС» небольшое (примерно 10…20 м), то форма этих характеристик существенно нелинейна. Моделирование показало, что антенная система должна располагаться на расстоянии l порядка 30 м. И это с учетом обеспечения незначительного влияния на работу угломера ортогонального направления [2, 3]. В этом случае для оценки декартовых координат ТС на участке местности (площадке) требуется незначительное количество повторяющихся измерений каждым угломером [4, 5].

Библиографический список

1. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 55 – 59.
2. Алгоритм дальномерного канала с учетом информации бортовых датчиков воздушных судов / И. В. Князев, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – М., 2013. – № 9. – С. 60 – 63.
3. Synthesis of channel tracking for random process parameters under discontinuous variation / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032112.
4. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.
5. Panasyuk, Yu. N. Synthesis of an Algorithm for Angle Measurement Channel of the Information-Measuring System of a Maneuvering Aircraft Given its Dynamic and Kinematic Characteristics / Yu N. Panasyuk, A. P. Pudovkin, S. N. Danilov // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency. – SUMMA 2019. – P. 73 – 76.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ФАЗОВОГО УГЛОМЕРА НА МАЛЫХ ДАЛЬНОСТЯХ

Д. П. Шпилёв, А. Н. Шитов, Н. А. Логвинов, С. Н. Данилов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: dimkashpi1@gmail.com; sashashitov70@gmail.com;
logvinov_kolya1@mail.ru; plabz@mail.ru)

В современной навигации наземного транспорта особое значение приобретают системы позиционирования, способные обеспечить высокую точность в условиях ограниченного пространства. Фазовый измеритель углов, работающий на малых расстояниях, может быть ключевым сенсором для обеспечения локальной навигации с достаточно высокой точностью. Однако в процессе такого управления ключевое влияние на точность локации оказывает нелинейность дискриминационной характеристики и ее изменение в зависимости от расстояния до сопровождаемого транспортного средства (ТС) [1]. Применение двух фазовых угломеров, оси которых ортогональны, позволяет оценить

обе координаты положения ТС на рассматриваемой площадке. Вычислительные и временные затраты метода зависят от величины погрешности фазового метода. Оценка этой погрешности позволяет обосновать алгоритм работы системы в задаче высокоточного управления беспилотной наземной техникой [2, 3].

Моделирование работы алгоритма основывалось на расчете расстояния до объекта от антенн при движении ТС, разности расстояний ТС – первая антенна и ТС – вторая антенна. Затем следовал расчет парциальных фаз ля ближнего и дальнего расстояния и определение величины погрешности в зависимости от угла и удаленности объекта (см. нижеприведенный фрагмент листинга программы MathCad):

$$\Delta S_{i,j} := \sin\left(2\pi\frac{dr_{i,j}}{\lambda}\right) - \sin\left(2\pi\frac{dr_{i,sred}}{\lambda}\right).$$

В результате моделирования были получены зависимости погрешности определения местоположения ТС фазовым измерителем от исследуемого расстояния, представленные на рис. 1.

Из графика видно, что для оценки угла ТС, находящегося на неопределенном расстоянии от антенн, во-первых, хранить в памяти таблицу с данными дискриминационных характеристик, во-вторых, иметь возможность оценки расстояния «ближняя граница площадки – ТС».

Также важным результатом моделирования является то, что была количественно и качественно оценена зависимость угловой погрешности от расстояния «центральная точка расположения антенн – ближняя граница площадки». Используя знание этой зависимости, можно изменять количество необходимых вычислений (итераций) при реализации системы оценки декартовых координат ТС на площадке двумя фазовыми угломерами.

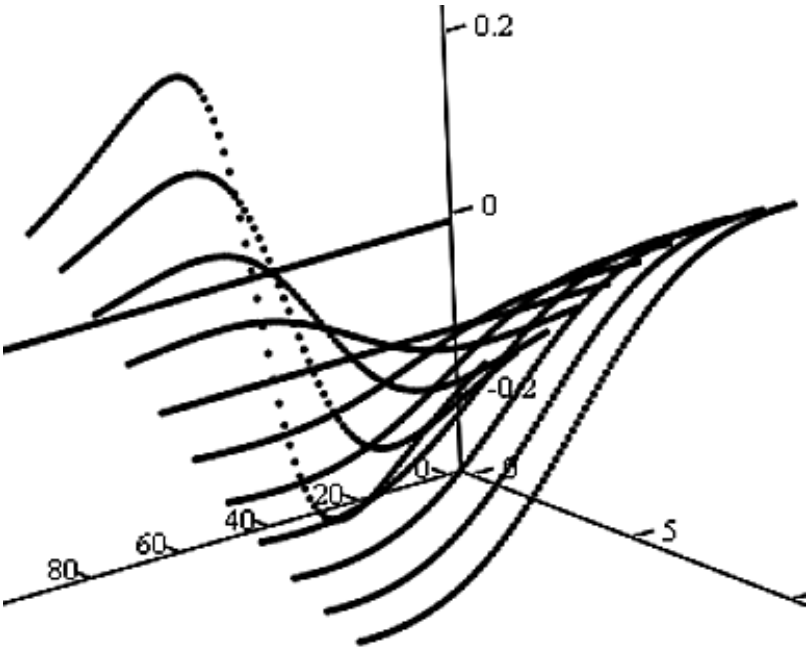


Рис. 1. Дискриминационные характеристики фазового измерителя

Библиографический список

1. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 55 – 59.

2. Алгоритм дальномерного канала с учетом информации бортовых датчиков воздушных судов / И. В. Князев, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 60 – 63.

3. Synthesis of channel tracking for random process parameters under discontinuous variation / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032112.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

Секция 2
СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ, ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ВОДОРОДА

С. В. Артёмова, С. М. Лемещенко

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
(e-mail: artemova_s@mirea.ru, lemecshenko@mirea.ru)

Эксплуатация турбогенераторов мощностью 300…1000 МВт с водородным охлаждением требует поддержания объемной концентрации водорода на уровне не ниже 97% [1]. Снижение концентрации до 95% приводит к образованию взрывоопасной смеси, уменьшение даже на 1% вызывает рост вентиляционных потерь на 10…18% [2]. Применяемые сегодня катарометрические и палладиевые газоанализаторы характеризуются погрешностью до 3% и необходимостью частой калибровки, что снижает их надежность при интеграции в современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

В таких условиях перспективным решением выглядит акустический метод, описанный в патенте RU 2550306 C1 [3], который теоретически обеспечивает погрешность не более 0,2% и не требует отбора пробы газа. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка чувствительности измерительной ячейки, входящей в состав разрабатываемой информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) на основе акустического метода.

Первым этапом разработки стало создание датчика и его тестирование. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

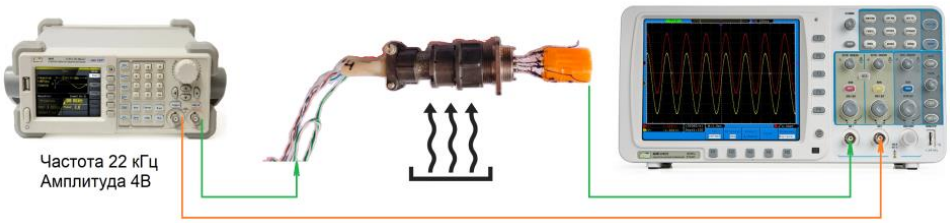


Рис. 1. Экспериментальная верификация акустической ячейки

Для проверки принципа действия был изготовлен макет измерительной ячейки методом FDM-печати из термостойкого пластика. Длина акустического тракта – 20 мм. На торцах установлены пьезоэлементы, подключенные к генератору (22 кГц, 4 В) и осциллографу (режим *X*–*Y*).

Среда для тестирования установки на первом этапе является модельной и представляет собой воздушную смесь. Полость между пьезоэлементами подвергается локальному нагреву (ΔT = 8 К, от 293 до 301 К). При этом скорость звука возросла с 343 до 348 м/с, что вызвало изменение фазового сдвига на $\Delta\varphi \approx 6{,}3°$. Это проявилось как наглядная деформация фигуры Лиссажу – переход от вытянутого эллипса к более сжатому (рис. 2).

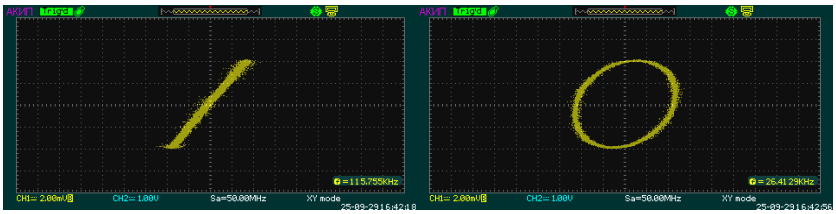


Рис. 2. Экспериментальная верификация акустической ячейки

На следующем этапе будет производиться проектировка герметичного макета для заполнения его водородом и проведения экспериментов с различной концентрацией водорода.

Библиографический список

1. РД 34.43.103–92. Методические указания по обеспечению взрывобезопасности при эксплуатации турбогенераторов с водородным охлаждением. – 1992.
2. Каплан, Б. Ю. Система измерения чистоты водорода в мощных турбогенераторах / Б. Ю. Каплан, М. В. Мостовской // Законодательная и прикладная метрология. – 2016. – № 3(142). – С. 29 – 33.
3. Пат. РФ № 2550306 С1. Способ измерения объемной концентрации водорода / Каплан Б. Ю. – 2015.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ОТКЛИКА ГИТАРНОГО КАБИНЕТА В НЕПОДГОТОВЛЕННОМ ПОМЕЩЕНИИ

М. А. Беляев, И. Е. Стародубцев, А. П. Панфилов

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: belyaev.ma@students.dvfu.ru, starodubtcev.iev@dvfu.ru, panfilov_ap@dvfu.ru)

При звукозаписи любой акустической системы, в том числе гитарного кабинета, в обычной студии или в домашних условиях микрофон регистрирует не только характер звучания динамика, но и акустический вклад помещения. В записываемый сигнал одновременно попадают прямое звуковое поле от громкоговорителя, а также его отражения от пола, потолка, стен, поздняя составляющая отражений от мебели и аппаратуры.

Провести такие замеры в безэховой камере можно далеко не всегда: подобные помещения есть не в каждой лаборатории, так как требуют специальной подготовки и редко доступны для прикладных задач в студии. Поэтому в реальной практике задача формулируется иначе: можно не исключать влияние комнаты из измерения полностью, а отделить ее вклад, насколько это необходимо для анализа.

Решением данной инженерной задачи становится пространственно-временной подход. Его смысл заключается в том, что результат измерения рассматривается не как один файл звукозаписи, полученный в произвольном положении перед кабинетом, а как дискретное множество результатов, строго зависимое от нескольких параметров: координат расположения микрофона и выбранным временным окном анализа.

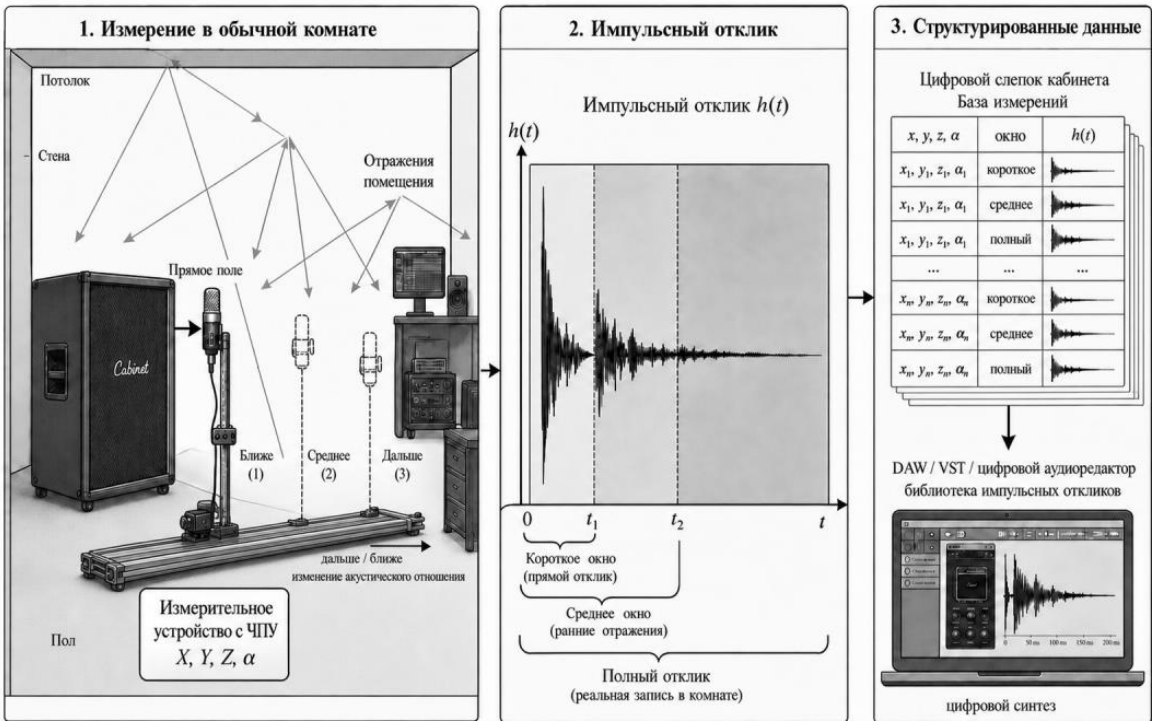


Рис. 1. Процесс создания цифровой копии гитарного кабинета

Практическая ценность такого решения состоит в том, что неподготовленное помещение перестает быть неконтролируемой помехой и превращается в известное условие эксперимента. Короткое временное окно дает возможность оценить тембр кабинета, средний интервал показывает влияние ближайших отражающих поверхностей, а полный отклик сохраняет характер реальной записи в данной комнате. Положение микрофона становится особенно важным, поскольку с увеличением расстояния меняется акустическое отношение между прямым и отраженным полем. Для студийной работы это будет полезно при решении задачи цифрового синтеза реальной акустической системы.

Для реализации такого эксперимента может использоваться малогабаритная система с числовым программным управлением: она позволит строго контролировать положение микрофона возвратом в сохраненные точки и фиксацией параметров каждого опыта. Принцип действия заключается в следующем:

шаговые двигатели перемещают микрофон по линейным осям и задают его угол, микроконтроллер и драйвера управляют приводами, а программный интерфейс позволяет сохранить координаты, номера точек и выбранные режимы обработки.

Связка координатного перемещения и временного анализа импульсной характеристики позволяет перейти от разовой записи кабинета к созданию его цифрового слепка. Такой слепок представляет собой не один усредненный отклик, а набор измерений, в котором каждому положению микрофона соответствует собственная временная и частотная характеристика. На основе такой базы можно оценивать вклад помещения, сравнивать варианты установки микрофона и формировать свою библиотеку импульсных откликов. В дальнейшем такие данные могут быть интегрированы в цифровые аудиоредакторы и использоваться в задачах моделирования звучания реального гитарного кабинета без повторного проведения полного цикла измерений.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 53575–2009 (МЭК 60268-5:2003). Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний. – М. : Стандартинформ, 2020. – 48 с.

2. ГОСТ IEC 60268-1–2014. Оборудование звуковых систем. Ч. 1. Общие положения. – М. : Стандартинформ, 2016. – 20 с.

3. Сапожков, М. А. Электроакустика : учебник для вузов / М. А. Сапожков. – М. : Связь, 1978. – 272 с.

4. Акустика : справочник / под ред. М. А. Сапожкова. – М. : Радио и связь, 1989. – 336 с

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕСТАНОВКИ ЗАТВОРА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ КРАНОВЫХ УЗЛОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Д. С. Бояркин, И. Р. Абузяров, Н. К. Юрков

Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия
(e-mail: boyarkyndmytry@gmail.com; 0400@npp-rubin.ru, yurkov_nk@mail.ru)

Процесс перестановки затворов трубопроводной арматуры (ТПА) магистральных газопроводов сопровождается циклическими механическими напряжениями, связанными с перепадом давления и турбулентным истечением газа через сечение крана, что ускоряет возникновение дефектов в структуре металла [1]. Для решения задачи удаленной перестановки затвора, контроля вибрационных параметров трубопроводов и ТПА и снижения вибрации на этапе перестановки затвора предлагается система адаптивного управления перестановкой затвора ТПА, включающая блок контроля вибрации и мобильную пневмогидростанцию. Гидравлическая функциональная схема пневмогидростанции представлена на рис. 1.

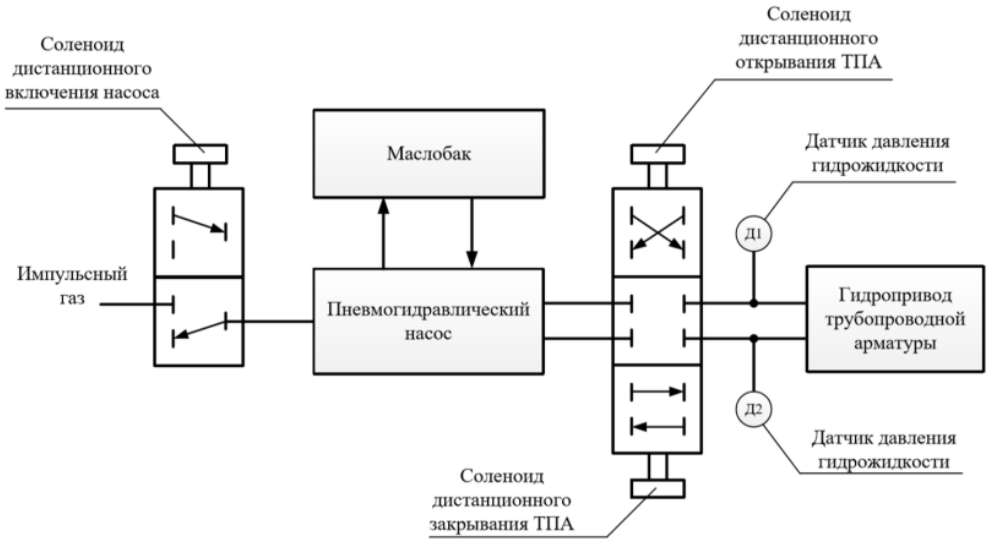


Рис. 1. Гидравлическая функциональная схема пневмогидростанции

Блок контроля параметров вибрации включает в себя пьезоэлектрический акселерометр, закрепляемый на объекте контроля, тракт усиления и фильтрации сигнала, интегратор, АЦП и микроконтроллер. Управляющие воздействия с данного блока поступают на блок управления пневмогидростанцией. Поскольку скорость потока через зазор затвора пропорциональна перепаду давления на входе и выходе запорного органа, а перепад давления меняется динамически при движении затвора, вводится упрощенная зависимость:

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = k\frac{d\alpha}{dt} = k\omega_з, \tag{1}$$

где α – угол поворота затвора; k – коэффициент пропорциональности; $\omega_з$ – угловая скорость перестановки затвора.

Управление скоростью перестановки затвора приводит к снижению скорости потока и возмущающей силы, вызывающей вибрацию трубопровода [2]. Следовательно, целевым параметром алгоритма контроля перестановки будет являться виброскорость, а управляющим воздействием – регулировка пропускной способности гидравлической линии пневмогидростанции. Для управления скоростью перестановки в алгоритм вводится функция регулирования:

$$V_{скз}\,\omega_з(t) = \omega_{max}\left(1 - K_{рег}\frac{V_{скз}(t) - V_{lim}}{V_{lim}}\right), \tag{2}$$

где $K_{рег}$ – эмпирический коэффициент пропорциональности регулятора; ω_{max} – максимальное значение угловой скорости перестановки затвора; V_{lim} – пороговое значение допустимой виброскорости; $V_{скз}$ – среднеквадратичное значение виброскорости трубопровода. Данная функция внедрена в алгоритм работы системы управления перестановкой затвора.

Внедрение предлагаемой системы обеспечивает автоматическое детектирование повышенной вибрации при перестановке затвора ТПА и принятие решения о регулировании процесса при превышении допустимых порогов.

Библиографический список

1. Оценка технического состояния технологических трубопроводов и регуляторов давления газа по частотному спектру виброскорости / Д. С. Бояркин, В. Д. Ежижанский, А. С. Макаров и др. // Надежность и качество : тр. международ. симпозиума. – Т. 2. – С. 115 – 120.
2. Blevins, R. D. Flow-induced Vibration [Вызванная потоком вибрация] / R. D. Blevins – 2-е изд. – Нью-Йорк : Van Nostrand Reinhold, 1990. – 575 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ СЕТЕВОЕ ХРАНИЛИЩЕ НА БАЗЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА С ЗАЩИЩЕННЫМ УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ

С. В. Бубен, А. Ю. Родионов

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: buben.sv@dfvu.ru, deodar1618@yandex.ru)

В условиях экспоненциального роста объемов цифровых данных и повсеместного внедрения облачных технологий все более острой становится проблема обеспечения одновременно экономической эффективности, информационной безопасности и полного контроля пользователя над хранимыми данными. Коммерческие облачные сервисы сопряжены с рекуррентными финансовыми затратами и передачей данных третьим сторонам, тогда как готовые сетевые хранилища или же NAS (Network-Attached Storage) корпоративного уровня отличаются высокой начальной стоимостью и привязкой к экосистеме производителя [1]. В данной работе предложено и реализовано альтернативное решение на базе малопотребляющего одноплатного компьютера.

Целью работы является разработка и практическая реализация энергоэффективного, отказоустойчивого и доступного из глобальной сети сетевого хранилища данных с полным контролем пользователя над инфраструктурой при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

В качестве вычислительной платформы выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi 3B с техническими характеристиками: процессор Broadcom BCM2837, 4 ядра ARM (Advanced RISC Machine, Reduced Instruction Set Computer) Cortex-A53, 1,2 ГГц, 1 ГБ LPDDR2 (Low Power Double Data Rate). Выбор обусловлен потреблением менее 20 Вт при круглосуточной работе, наличием порта Gigabit Ethernet и достаточностью ресурсов для целевых задач. Для хранения данных используются два жестких диска Toshiba HDWD110 объемом 1 ТБ каждый, подключенных через переходники SATA-USB (Serial Advanced Technology Attachment, Universal Serial Bus) 3.0 с внешним питанием 12 В.

Программная часть системы реализована на базе операционной системы Raspberry Pi OS (Operating System) Lite 64-bit – минималистичного дистрибутива без графического интерфейса, потребляющего 40…80 МБ ОЗУ (оперативное запоминающее устройство). Отказоустойчивость хранилища обеспечивается программным массивом RAID (Redundant Array Of Independent Disks) 1, организованным средствами пакета mdadm с файловой системой EXT4 (Fourth

Extended Filesystem). Зеркалирование данных на два диска гарантирует сохранность информации при выходе из строя одного накопителя. Доступ к файлам в локальной сети предоставляется по протоколу SMB (Server Message Block) посредством пакета Samba с разграничением прав пользователей.

Для обеспечения защищенного удаленного доступа первоначально была реализована связка WireGuard и DDNS (Dynamic Domain Name System) через сервис duckdns.org. В процессе эксплуатации выявлена критическая уязвимость архитектуры: блокировка домена duckdns.org на уровне интернет-провайдера сделала невозможным обновление динамического IP-адреса (Internet Protocol). В качестве альтернативы применено решение Tailscale – оверлейная сеть поверх протокола WireGuard с централизованной координацией устройств. Tailscale автоматически обходит проблемы NAT (Network Address Translation) и динамических адресов, не требует проброса портов на маршрутизаторе и обеспечивает сквозное шифрование трафика [2].

Тестирование дисковой подсистемы выявило, что узким местом является шина USB 2.0: максимальная скорость чтения одиночного диска составила 33 МБ/с. Организация RAID 1 снижает скорость последовательной записи на 35…40% (до 20 МБ/с) вследствие синхронной записи на оба диска через один контроллер. Нагрузка на ЦП (центральный процессор) при операциях с RAID достигает 75…80%, однако не превышает 100%, что подтверждает достаточность вычислительных ресурсов одноплатного компьютера для данной задачи. Сетевое тестирование показало пропускную способность 74,8 Мбит/с при задержке 3,6 мс в локальной гигабитной сети, и 5,2 Мбит/с с задержкой 39,3 мс при удаленном доступе через Tailscale.

Экономический анализ показал, что годовое потребление электроэнергии системой составляет 175 кВт·ч, тогда как аналогичное хранилище на базе персонального компьютера потребляет порядка 525 кВт·ч. Таким образом, экономия эксплуатационных расходов составляет свыше 1600 руб. в год при тарифе 4,58 руб./кВт·ч для города Владивостока.

В результате работы создана функционирующая система хранения данных, отвечающая всем поставленным требованиям: энергопотребление менее 20 Вт, отказоустойчивость на уровне RAID 1, доступность из глобальной сети с шифрованием. Полученные технические характеристики достаточны для целевых сценариев: хранения документов, фотоархивов и резервного копирования данных. Перспективы развития системы предполагают переход на платформу Raspberry Pi 5 с нативным контроллером USB 3.0, применение платы расширения с интерфейсом SATA, а также расширение массива до конфигурации RAID 10.

Библиографический список

1. Tomes, E. A Comparative Study of HDD and SSD RAIDs' Impact on Server Energy Consumption / E. Tomes, N. Altiparmak // 2017 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER). IEEE. – 2017. – С. 625–626.

2. A Performance Analysis of VPN Technologies Used in an IoT Environment / D.-F. Hritcan, A. Graur, D.-G. Balan, E.-M. Timofte // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 81 – 88.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ

Гбаго Допавоги

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: gbagodopavogui7@gmail.com)

Этот проект крайне важен для Гвинеи – страны, сталкивающейся с частыми перебоями в производстве электроэнергии (отключения, низкое покрытие сети). Хотя в Гвинее имеется большой гидроэнергетический потенциал с такими плотинами, как Гарафири, Калета и Суапити, электроэнергия остается дорогой и нестабильной. Такая ситуация частично обусловлена неэффективным использованием энергии населением, из которого 68% – неграмотные.

Сокращая потребление электроэнергии на освещение за счет автоматизации, эта система направлена на разгрузку национальной электросети и снижение счетов за электроэнергию для домохозяйств и предприятий.

Освещение составляет примерно 15…20% мирового потребления электроэнергии, особенно в коммерческих и жилых зданиях.

В настоящее время существует ряд проблем:

– часто завышенное или заниженное освещение;
– отсутствие динамической адаптации к реальным условиям;
– энергетические потери и визуальный дискомфорт.

Целью проекта является разработка интеллектуальной, экономичной и отзывчивой системы для оптимизации освещения.

Для достижения цели необходимо разрешить ряд проблем и технических ограничений [1, 2].

Каким способом автоматически регулировать искусственное освещение в зависимости от переменных параметров, одним из которых является естественное освещение (солнечный свет).

Эти задачи требуют контроллера с множественными входами и эффективной логики приоритетов.

Предлагаемая система построена по классической архитектуре: датчики → микроконтроллер → драйвер светодиодов. Или с взаимосвязью электронных компонентов (рис. 1, 2).

Ключевые компоненты.

Датчики:

Фоторезистор / люксметр (для измерения окружающего освещения).

Обработка: Микроконтроллер (Arduino, ESP32, Raspberry Pi).

Исполнительные устройства: Модули светодиодов с широтно-импульсной модуляцией (PWM), диммеры.

Компоненты системы:

Ниже приведена иллюстрация основных электронных компонентов, используемых в подобных системах:

– Трансформатор: для преобразования переменного тока (AC) 230 В в 9 В или 12 В.

– Диодный мост: для выпрямления преобразованного тока в постоянный (DC).

– Поляризованный конденсатор: для фильтрации и обеспечения одностороннего тока в цепи.

– Резисторы: для ограничения тока, проходящего через каждый компонент.

– Светодиоды: для визуальной индикации наличия тока в цепи.

– Потенциометр: для регулировки тока.

– Фоторезистор: основной элемент цепи, выполняющий функцию датчика света для обнаружения присутствия, отсутствия или уровня освещенности с целью автоматического включения и выключения освещения.

– Транзистор NPN (2N2222 или BC547): используется для коммутации (электронный переключатель) и усиления слабых сигналов.

– Диод 1N4007.

– Реле на 12 В или 25 В для управления цепью с внешними устройствами.

Условия использования:

Солнечный свет = ДА, искусственное освещение выключено (днем – экономия энергии).

Солнечный свет = НЕТ, искусственное освещение включено (ночью).

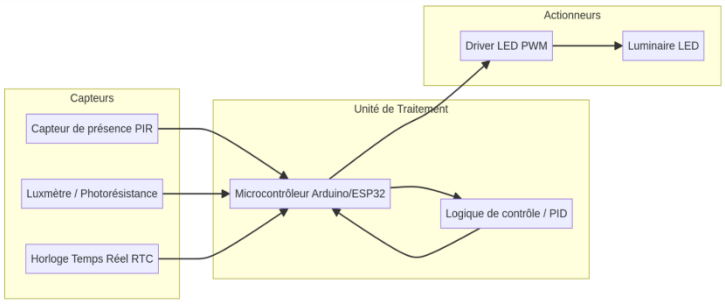


Рис. 1. Схема архитектуры

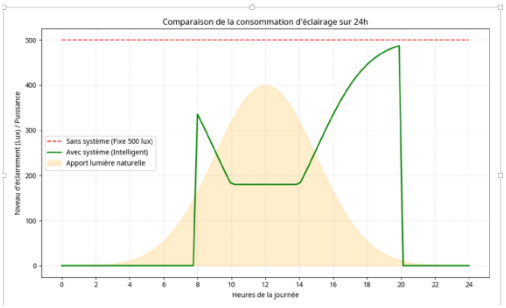


Рис. 2. График включения освещения

Преимуществами системы являются значительное снижение счетов за электроэнергию, адаптивный визуальный комфорт, продление срока службы светодиодов, решение с умеренной стоимостью, пригодное для тиражирования.

Библиографический список

1. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания информационно-измерительных и управляющих систем с применением нейросетевых технологий / И. Г. Рязанов, Н. Г. Чернышов, Ю. Т. Зырянов, А. Ю. Наумова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 197 – 205.

2. Интеллектуальная система энергосберегающего управления асинхронными двигателями (на английском языке) / Н. Г. Чернышов, М. А. Каменская, С. В. Артемова, А. А. Артемов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 374 – 380.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИСУТСТВИЯ

Гбаго Допавоги

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: gbagodopavogui7@gmail.com)

Система автоматического управления освещением на основе обнаружения присутствия – это устройство, которое включает или регулирует яркость света только тогда, когда в заданной зоне обнаруживаются люди или движущиеся объекты, а затем выключает свет или уменьшает его яркость при отсутствии присутствия. Это позволяет снизить потребление энергии, повысить комфорт и увеличить безопасность в зданиях, на парковках, на лестницах или в системах уличного освещения [1, 2].

Основу системы составляют датчики присутствия, часто PIR, ультразвуковые или микроволновые, которые анализируют движение или тепло в пространстве. Когда присутствие обнаружено, датчик отправляет сигнал в блок управления – микроконтроллер, реле или автомат, который затем включает лампы или модули освещения.

При отсутствии движения в течение заданного времени система отключает или уменьшает освещение, что оптимизирует потребление. Также можно добавить датчик освещенности, чтобы не включать свет без необходимости днем.

Типичная схема системы автоматического освещения по присутствию обычно включает:

– источник питания (сеть 230 В или постоянное напряжение);
– датчик присутствия (PIR, ультразвуковой или микроволновый);
– блок управления (реле, NE555, микроконтроллер или автомат);
– светильники (светодиодные лампы или люминесцентное освещение).

Датчик улавливает движение, передает логический сигнал на реле или микроконтроллер, который замыкает или размыкает цепь питания ламп. Время включения может задаваться таймером, например, от 1 до 3 мин, чтобы избежать слишком быстрых отключений.

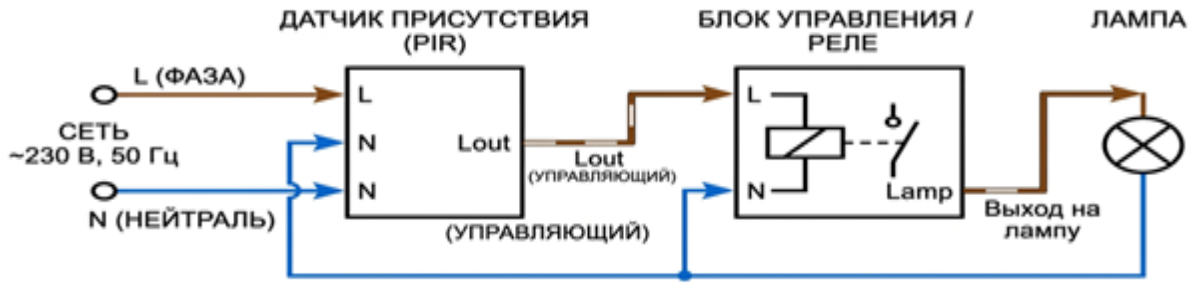


Рис. 1. Схема архитектуры

Схему можно разделить на 2 блока:

– входной блок: источник 230 В + датчик присутствия + датчик освещенности;

– выходной блок: реле + лампы + при необходимости счетчик или интерфейс контроля.

Присутствие: состояние «1» (движение обнаружено) или «0» (движения нет).

Освещение: состояние «1» (включено) или «0» (выключено), с задержкой отключения после окончания присутствия.

Этот хорошо показывает, что:

– как только появляется движение, освещение переходит в состояние 1;

– когда присутствие исчезает, свет остается включенным еще в течение времени задержки, а затем возвращается в 0.

Преимущества и ограничения системы:

– значительное снижение потребления электроэнергии, поскольку лампы не горят без необходимости;

– повышение безопасности за счет освещения при движении в коридорах, на парковках и т.д.;

– удобство использования: нет необходимости вручную выключать свет.

Возможное ограничение – чувствительность к типу движения. Некоторые датчики не реагируют, если человек долго остается неподвижным; необходимость правильно выбрать зону обнаружения, чтобы избежать ложных срабатываний.

Преимуществами системы являются значительное снижение счетов за электроэнергию, адаптивный визуальный комфорт, продление срока службы светодиодов, решение с умеренной стоимостью, пригодное для тиражирования.

Библиографический список

1. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания информационно-измерительных и управляющих систем с применением нейросетевых технологий / И. Г. Рязанов, Н. Г. Чернышов, Ю. Т. Зырянов, А. Ю. Наумова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 197 – 205.

2. Интеллектуальная система энергосберегающего управления асинхронными двигателями (на английском языке) / Н. Г. Чернышов, М. А. Каменская, С. В. Артемова, А. А. Артемов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 374 – 380.

ИНТЕГРАЦИЯ SCADA, IIoT И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

А. А. Гордеев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: alexander.gordeeff2011@yandex.ru)

Электроснабжение современного промышленного объекта является сложной технической системой, от надежности которой зависит устойчивость производственного процесса. Работа технологических линий, электроприводов, насосных и компрессорных установок, систем автоматизации и безопасности невозможна без стабильной подачи электроэнергии требуемого качества. Поэтому традиционные подходы к управлению, основанные только на диспетчерском контроле и локальной автоматике, уже не всегда обеспечивают необходимый уровень надежности и эффективности.

В связи с этим актуальным направлением становится интеграция SCADA, промышленного интернета вещей (IIoT) и цифровых двойников. Эти технологии позволяют контролировать параметры сети, прогнозировать развитие режимов, оценивать последствия управляющих воздействий и повышать эффективность эксплуатации оборудования.

SCADA-система является базовым элементом управления электроснабжением промышленного объекта. Она обеспечивает сбор данных, визуализацию параметров, архивирование событий и поддержку действий оперативного персонала. С ее помощью контролируются напряжение, ток, активная и реактивная мощность, частота, состояние выключателей, трансформаторов, распределительных устройств и систем компенсации реактивной мощности. Она также применяется для централизованного мониторинга, управления, диагностики неисправностей и предиктивного обслуживания [1].

Однако классическая SCADA не всегда дает достаточно подробную информацию о техническом состоянии оборудования. Эту задачу решает IIoT, который позволяет подключать к единой среде датчики, интеллектуальные электронные устройства, цифровые счетчики и контроллеры. Благодаря этому система получает необходимые ей данные.

Интеграция SCADA и IIoT повышает наблюдаемость системы электроснабжения, ускоряет обнаружение аварийных и предаварийных режимов, помогает точнее определять причины отклонений и создает основу для обслуживания оборудования по фактическому состоянию. SCADA при этом является диспетчерским центром, а IIoT расширяет информационную базу управления за счет распределенного сбора данных.

Следующим важным элементом является цифровой двойник. Он основан на принципе синхронизации данных физического объекта с вычислительным пространством, где аналитические инструменты используются для повышения эффективности и надежности оборудования [2].

Цифровой двойник позволяет моделировать режимы работы сети, анализировать загрузку трансформаторов, рассчитывать потери электроэнергии, оценивать качество напряжения и проверять варианты переключений. Его преимущество заключается в возможности оценивать последствия управляющих воздействий до их реализации на реальном объекте.

Совместное применение SCADA, IIoT и цифровых двойников формирует основу интеллектуальной системы управления электроснабжением. Такая система позволяет прогнозировать изменения электрических нагрузок, оптимизировать распределение активной и реактивной мощности, контролировать техническое состояние оборудования, предотвращать перегрузки трансформаторов и кабельных линий, снижать потери электроэнергии, повышать надежность электроснабжения, моделировать аварийные режимы без риска для реальной системы.

Внедрение SCADA, IIoT и цифровых двойников связано с рядом ограничений: высокой стоимостью модернизации, сложностью интеграции оборудования разных производителей, необходимостью защиты промышленных сетей связи, зависимостью качества цифрового двойника от точности исходной модели и потребностью в подготовке персонала. При этом цифровизация электроснабжения повышает требования к кибербезопасности, поскольку вмешательство в систему управления может нарушить технологический процесс. Несмотря на эти трудности, совместное применение данных технологий является перспективным направлением развития систем управления электроснабжением промышленных объектов. SCADA обеспечивает оперативный контроль и диспетчеризацию, IIoT расширяет возможности сбора данных о состоянии оборудования, а цифровой двойник позволяет анализировать и прогнозировать режимы работы. В результате система электроснабжения переходит от реактивного управления к прогнозному, повышая надежность, энергоэффективность и управляемость промышленного объекта.

Библиографический список

1. Schneider Electric. Unleashing Artificial Intelligence on the Industrial Edge to Revolutionize SCADA Systems: Use Cases in the Water & Wastewater Industry [Электронный ресурс]. – Schneider Electric. – URL : https://www.se.com/mk/en/download/document/998-23528764_GMA/

2. Lee, J. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems / J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – V. 3. – P. 18 – 23.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. А. Гордеев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: alexander.gordeeff2011@yandex.ru)

Современные промышленные предприятия характеризуются высокой энергоемкостью, сложной структурой электрических сетей и повышенными требованиями к надежности электроснабжения, поскольку электроснабжение играет ключевую роль в обеспечении бесперебойной работы промышленных предприятий. Поэтому перебои питания, колебания напряжения и снижение качества электроэнергии могут приводить к остановке оборудования, росту затрат и возникновению аварийных ситуаций [1].

Система электроснабжения промышленного предприятия с точки зрения автоматизации и управления представляет собой сложный технический объект, включающий понизительные подстанции, распределительные пункты, трансформаторы, кабельные линии, коммутационные аппараты, установки компенсации реактивной мощности и электроприемники различного назначения. Для эффективного управления таким объектом необходим постоянный контроль технологических параметров оборудования. Именно поэтому особое значение в системе управления имеет информационно-измерительная подсистема, обеспечивающая сбор, передачу, обработку и хранение данных о состоянии отдельных элементов объекта управления. В состав информационно-измерительной подсистемы входят интеллектуальные счетчики, датчики тока и напряжения, анализаторы качества электроэнергии, цифровые измерительные преобразователи и программируемые логические контроллеры.

Полученные с помощью информационно-измерительной подсистемы данные становятся основой для построения интеллектуальной автоматизированной системы оптимизации режимов электроснабжения. Такая система анализирует текущие параметры сети, выявляет отклонения и формирует рекомендации по выбору оптимального режима. Ее основными задачами являются снижение потерь электроэнергии, стабилизация напряжения, компенсация реактивной мощности, равномерная загрузка трансформаторов, предупреждение перегрузок и повышение надежности электроснабжения. Использование интеллектуальной системы управления электропотреблением позволяет оптимизировать нагрузку, уменьшить потребление энергии и сократить затраты [1].

Важными направлениями оптимизации являются управление реактивной мощностью и регулирование напряжения. Автоматизированная система должна определять необходимый уровень компенсации реактивной мощности с учетом текущей нагрузки, что позволяет снизить токи в сети, уменьшить потери электроэнергии и повысить коэффициент мощности. Одновременно система должна контролировать напряжение в узлах сети и формировать воздействия для его

стабилизации, поскольку отклонения напряжения ухудшают работу электродвигателей, преобразовательной техники и систем управления.

Для решения указанных задач целесообразно применять интеллектуальные методы оптимизации. Перспективными инструментами являются генетические алгоритмы, метод роя частиц и машинное обучение. Генетические алгоритмы могут использоваться для выбора оптимального сочетания компенсирующих устройств и распределения нагрузки между трансформаторами. Метод роя частиц позволяет находить оптимальные параметры управления в многомерной системе. Машинное обучение может применяться для прогнозирования нагрузки, выявления предаварийных состояний и оценки технического состояния оборудования [2].

Предлагаемая интеллектуальная автоматизированная система должна быть построена по многоуровневому принципу: измерительный уровень собирает данные с датчиков, счетчиков и анализаторов качества электроэнергии; контроллерный уровень выполняет первичную обработку и базовое управление; диспетчерский уровень визуализирует, архивирует и формирует отчеты; аналитико-оптимизационный уровень выполняет расчет оптимальных режимов и поддержку принятия решений; исполнительный уровень реализует сформированные управляющие воздействия.

Внедрение интеллектуальных систем оптимизации режимов электроснабжения промышленных предприятий связано с высокой стоимостью оборудования и программного обеспечения, необходимостью интеграции с существующими системами, требованиями к квалификации персонала и обеспечению кибербезопасности. Поэтому их внедрение целесообразно осуществлять поэтапно: сначала для мониторинга и поддержки принятия решений, затем – для автоматизированной оптимизации отдельных процессов. Несмотря на перечисленные трудности, разработка и внедрение таких систем является перспективным направлением промышленной энергетики, поскольку они позволяют повысить надежность, энергоэффективность и устойчивость электроснабжения.

Библиографический список

1. Млачнев, Н. В. Разработка и улучшение электроснабжения для промышленных предприятий / Н. В. Млачнев // Научный аспект. – 2024. – URL : https://na-journal.ru/2-2024-elektrotehnika/8869-razrabotka-i-uluchshenie-elektrosnabjeniya-dlya-promyshlennyh-predpriyatii

2. Боярский, Э. Ф. Инновационные методы оптимизации энергетических процессов в системах электроснабжения / Э. Ф. Боярский, В. А. Иванов, А. К. Сейтжанов // Вестник науки. – 2024. – № 12(81). – Т. 2. – С. 1928 – 1932.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

В. Д. Ежижанский, И. Р. Абузяров, Н. К. Юрков

Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия
(e-mail: vityastalkerxdxd@gmail.com; 0400@npp-rubin.ru, yurkov_nk@mail.ru)

Процесс заправки транспортных средств сжатым газом на газонаполнительных станциях подразумевает наличие утечек газа и выделение тепла, что обуславливает повышенные требования к безопасности и надежности узлов станции. Необходимо отслеживать концентрацию газа в воздухе (для недопущения воспламенения), удерживать в заданных пределах температуру (для надежной работы сложной аппаратуры станции) и регистрировать наличие пламени или дыма на станции (для своевременного принятия мер по недопущению развития взрывоопасной ситуации) [1].

Для контроля параметров воздуха в помещениях станции предлагается информационно-измерительная система (ИИС), включающая в себя датчики, исполнительные механизмы и программируемое реле в качестве средства автоматизации.

Структура ИИС представлена на рис. 1.

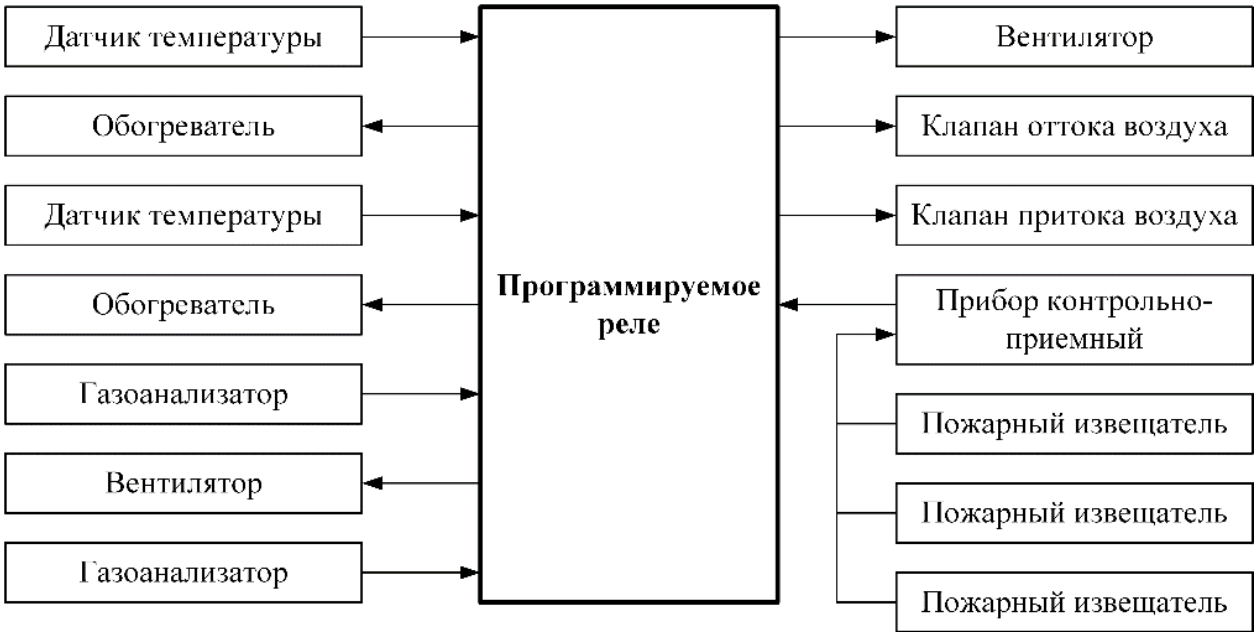


Рис. 1. Структура ИИС

Контроль температуры осуществляется при помощи датчиков температуры, газоанализаторы отслеживают объемную долю метана в воздухе, а совокупность пожарных извещателей и прибора контрольно-приемного регистрирует наличие дыма или пламени в помещении станции.

Обогреватели нагревают воздух станции в случае понижения температуры ниже нижней уставки. Вентиляторы охлаждают помещение в случае повы-

шения температуры выше верхней уставки и обеспечивают продувку, понижая концентрацию газа в воздухе станции. Противопожарные клапаны, управляемые электромагнитными приводами, обеспечивают приток и отток воздуха в помещение станции, в случае появления дыма или пламени и закрываются, герметизируя помещение.

Для повышения безопасности каналы вытяжки воздуха следует сделать «лабиринтными» и обеспечить возможность их блокировки.

Канал вытяжки должен быть защищен решетками фильтрации мусора и оборудован термокерамической заслонкой, которая при нагревании расширяется, перекрывая канал в случае пожара снаружи или внутри газонаполнительной станции перекрывая приток и отток необходимого для горения воздуха [2].

Представленная информационно-измерительная система позволяет контролировать опасные факторы работы газонаполнительной станции, повышая ее надежность и безопасность.

Библиографический список

1. Солнцев, В. Б. Взрывозащита электрооборудования во взрывобезопасных газовых средах / В. Б. Солнцев, М. В. Пономарев, Д. С. Подсевалов. – М. : Литрес, 2021. – 100 с.

2. Анализ особенностей систем вентиляции автомобильной газонаполнительной компрессорной станции модульного типа / В. Д. Ежижанский, Д. А. Донькин, Д. С. Бояркин и др. // Перспективы развития информационных технологий систем управления : сб. науч. ст. по материалам I науч.-техн. конф. молодых ученых, специалистов и студентов. – Пенза, 2025. – С. 35 – 42.

АНТЕННЫ НА МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ: ПРИНЦИПЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРИМЕНЕНИЕ

С. К. Казьмин, И. П. Медведев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: serzh.kazmin.123@gmail.com)

Введение. Переход от крупногабаритных спутников к группировкам малых аппаратов (CubeSat) потребовал создания легких, низкопрофильных антенн. Микрополосковые (патч) антенны – плоская структура «патч – диэлектрик – экран» – наилучшим образом отвечают этим требованиям [1, с. 412]. Однако тип источника сигнала (активное или пассивное зондирование) диктует разные приоритеты: для РСА нужна широкая полоса и фазирование, для радиометра – минимальные потери. Цель работы – систематизировать сведения о современных микрополосковых излучателях ДЗЗ с учетом этих различий.

1. Определение и устройство. Метаповерхность – двумерная периодическая структура из резонансных элементов (метаатомов) размером λ/5…λ/10.

За счет изменения формы, ориентации и взаимного расположения элементов управляют фазой (0…360°), амплитудой (0…1) и поляризацией отраженной/прошедшей волны [1, 8].

В антеннах метаповерхности используются как:

– импедансные поверхности для преобразования поверхностной волны в пространственную;

– суперстраты (металинзы) над облучателем;

– непосредственно излучающие структуры (метаповерхностная антенна).

Пример. Тензорная метаповерхность в Ku-диапазоне (12…18 ГГц) обеспечивает апертурную эффективность до 50%, полосу рабочих частот 8% при толщине структуры 0,1λ [4].

2. Реконфигурируемые антенны. Включение PIN-диодов, варакторов или диодов Ганна в каждый метаатом позволяет переключать фазу отражения/излучения с дискретностью 1 бит (0/π) или более. Время переключения – до 1 мкс.

Конкретные разработки:

– 1-битная реконфигурируемая метаповерхность с двойной поляризацией, диапазон 9…10,6 ГГц, максимальный коэффициент усиления 23,2 dBi, ширина полосы 15%. Обеспечивает независимое управление излучением и рассеянием [5];

– аналогичная структура на PIN-диодах в диапазоне 7,4…8,4 ГГц, пиковое усиление 22,6 dBi, переключение диаграммы направленности на ±30° за 4 дискретных состояния [6];

– RIS (Reconfigurable Intelligent Surface): плоская панель из сотен метаатомов (например, 10×10…100×100), управляющая фазой отраженного сигнала с шагом 22,5° (4 бита). RIS может работать одновременно как антенна, рассеиватель и поглотитель. Экспериментальный образец (3 в 1) для диапазона 5,5 ГГц демонстрирует потери на отражение –1,2 дБ и подавление кросс-поляризации –30 дБ [7].

3. Применения с конкретными результатами

– спутниковая связь (Ku/Ka-диапазоны): разработана антенна для абонентского терминала с усилением 32 dBi при апертуре 30×30 см, стоимость снижена в 3 раза относительно фазированной решетки [3, 1];

– 5G/6G (диапазон 3,5…3,8 ГГц): RIS-панель 1×1 м компенсирует «мертвые зоны» в помещении, повышая отношение сигнал/шум на 12 дБ в точке приема [2, 7];

– MIMO 4×4: введение метаповерхности между элементами решетки снижает взаимную связь с –12 до –28 дБ на центральной частоте при расстоянии между антеннами 0,5λ [8];

– БПЛА: плоская антенна на метаповерхности массой 80 г (включая схему управления) обеспечивает усиление 18 dBi на 2,4 ГГц и позволяет переключать луч на 4 направления [9].

Вывод. Метаповерхности позволяют создавать антенны с толщиной <0,1λ, электрической перестройкой луча за микросекунды и коэффициентом усиления до 23 dBi в Ku-диапазоне. Реальные промышленные образцы уже

используются в спутниковых терминалах, RIS для 5G и бортовых системах БПЛА. Дальнейшее развитие – 4-битные метаповерхности (16 фазовых состояний) и интеграция с CMOS-управлением для работы до 100 ГГц (6G).

Библиографический список

1. Кодирующие метаматериалы, цифровые метаматериалы и программируемые метаматериалы / Т. Дж. Цуй, М. Ц. Ци, С. Ван и др. // Light: Science & Applications. – 2014. – Т. 3. – С. e218.
2. Development of antenna system for use in meteorological and climatic control complexes / M. A. Kudryashov, O. A. Belousov, V. I. Tetyukhin, et al. // Journal of Physics: Conference Series : 15, Virtual, Online, 09 – 11 ноября 2021 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 012094.
3. Метод развязки антенных решеток на метаповерхности (MAAD) для снижения взаимной связи в системах MIMO / З. Ван и др. // Scientific Reports. – 2018. – Т. 8. – № 3152.
4. Особенности применения технологий искусственного интеллекта при построении ГИС на основе радиоголографических изображений для цифровых систем точного земледелия / А. А. Тришаков, А. О. Смирнов, Д. Ю. Потлов, О. А. Белоусов // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием для студентов, молодых ученых и специалистов, Тамбов, 19 октября 2022 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – С. 55–56.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ ТИПА ИСТОЧНИКА

С. К. Казьмин, М. А. Фомин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: serzh.kazmin.123@gmail.com)

Введение. Переход от крупногабаритных спутников к группировкам малых аппаратов (CubeSat) потребовал создания легких, низкопрофильных антенн. Микрополосковые (патч) антенны – плоская структура «патч–диэлектрик–экран» – наилучшим образом отвечают этим требованиям. Однако тип источника сигнала (активное или пассивное зондирование) диктует разные приоритеты: для РСА нужна широкая полоса и фазирование, для радиометра – минимальные потери. Цель работы – систематизировать сведения о современных микрополосковых излучателях ДЗЗ с учетом этих различий.

1. Активное зондирование (РСА и кубсаты). В радиолокаторах с синтезированной апертурой антенна должна обеспечивать усиление 30…40 дБ и уровень боковых лепестков < –20 дБ. Оптимальное решение – активные фазированные решетки (АФАР) на микрополосковых элементах. Российский эксперимент «Напор-миниРСА» на МКС использует АФАР 16×16 на подложке Rogers RO4003 (ε < sub > *r* </sub> = 3,38, *h* = 0,508 мм). Измеренное усиление на 9,6 ГГц…31,2 дБ, КСВН < 2 в полосе 200 МГц.

Для беспилотных авиационных систем разработана микрополосковая решетка L-диапазона (1,27 ГГц) с круговой поляризацией и наклоном луча. Благодаря чебышевскому распределению мощности достигнут уровень боковых лепестков –22 дБ [3, с. 96]. Для наноспутников 1U предложена решетка 4×4 на 5,8 ГГц с последовательным вращением поляризации; пиковое усиление – 13,34 дБи, полоса по коэффициенту эллиптичности 3 дБ – от 5,45 до 6,29 ГГц [4, с. 35]. Другая разработка – V-образная патч-решетка для S-диапазона (2,45 ГГц) с усилением 8,95 дБи и осевым коэффициентом <5 дБ в секторе 61°.

Проблема поверхностных волн в плотных решетках решается использованием EBG-структур (электромагнитных запрещенных зон), снижающих взаимную связь на 12…15 дБ.

2. Пассивное зондирование (СВЧ-радиометрия). Прием собственного теплового излучения Земли (радиояркостная температура 50…300 К) требует потерь в антенне не более 0,2 дБ. Для микрополосковых антенн это достижимо только на подложках с tgδ < 0,001. В миссии SMAP (NASA) облучатель 6-метровой зеркальной антенны выполнен на политетрафторэтилене (ε*r* = 2,08, tgδ = 0,0004) на частоте 1,413 ГГц; потери – 0,18 дБ, радиометрическая точность – 0,7 К.

Российский сканер MTVZA-ГЯ на спутнике «Метеор-М» № 2-4 использует микрополосковую приемную решетку для калибровки по радиоизлучению Солнца. Обработка 500 изображений позволила уточнить ширину луча (3,1° вместо расчетных 2,8°) и снизить погрешность геопривязки с 7 до 1,5 км [8, с. 116]. Калибровка осуществляется по двум опорным нагрузкам: «горячей» (бортовой калибратор) и «холодной» (реликтовое излучение 2,73 К).

Для устранения боковых лепестков в задней полусфере микрополосковые радиометрические антенны снабжаются металлической рамкой с радиопоглощающим покрытием, что снижает уровень паразитного приема до –28 дБ.

Вывод. Микрополосковые антенны успешно применяются в ДЗЗ как с активными, так и с пассивными источниками. Для РСА и кубсатов приоритетны широкополосность и фазированное управление (усиление до 31 дБ, полоса до 15%). Для радиометрии критически важны сверхмалые потери (tgδ < 0,001) и стабильная калибровка (точность 0,7 К). Приведенные примеры подтверждают, что правильно выбранный материал подложки и топология позволяют удовлетворить даже жестким требованиям космического приборостроения.

Библиографический список

1. Балянис К. А. Теория антенн: анализ и проектирование / К. А. Балянис. – 4-е изд. – Хобокен : John Wiley & Sons, 2016. – 1104 с.
2. Development of antenna system for use in meteorological and climatic control complexes / M. A. Kudryashov, O. A. Belousov, V. I. Tetyukhin et al. // Journal of Physics: Conference Series : 15, Virtual, Online, 09 – 11 ноября 2021 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 012094.
3. Магомедов, Н. И. Методы управления антенными решетками / Н. И. Магомедов, К. С. Сайфуллозода, О. А. Белоусов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной «Дню радио и связи» и 80-летию победы в Великой Отечественной войне, Тамбов, 07 мая 2025 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2025. – С. 189–190.
4. Fan, Y. Microstrip Antennas Integrated with Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structures: A Low Mutual Coupling Design for Array Applications / Y. Fan, F. Yang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2003. – V. 51, No. 10. – P. 2936 – 2946.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ СШП АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ В СИСТЕМЕ СВЯЗИ

Р. Д. Карих

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: KarikhRD@yandex.ru)

В системах радиосвязи новых поколений (5G/6G) сверхширокополосные (СШП) сигналы позволяют совмещать высокоскоростную передачу данных и точное позиционирование. Ключевая характеристика позиционирования – среднеквадратическая ошибка (*RMSE*) оценки времени прихода (Time of Arrival, *TOA*) сигнала, связанная с ошибкой по дальности соотношением $\sigma_R = c\sigma_\tau / 2$. Применение антенных решеток (*AP*) повышает отношение сигнал/шум (ОСШ) за счет когерентного сложения, что улучшает точность оценки *TOA*. В работе исследуется, как *RMSE*(τ) зависит от числа элементов *M AP*, и определяются минимальные значения *M*, обеспечивающие требуемую точность [1].

Рассматривается линейная эквидистантная *AP* из *M* изотропных элементов с шагом $d \le \lambda_{\min}/2$. На решетку падает СШП-сигнал с энергией E_s, принимаемый на фоне аддитивного белого гауссовского шума с дисперсией σ^2 на каждом элементе. ОСШ на один элемент: $SNR_0 = E_s/\sigma^2$. После когерентного

суммирования сигналов всех элементов (формирование луча на источник) результирующее ОСШ составляет:

$$SNR_{AR} = M \cdot SNR_0. \quad (1)$$

Для оценки *TOA* используется согласованная фильтрация. Нижняя граница Крамера–Рао (*CRLB*) для дисперсии оценки времени прихода СШП-сигнала имеет вид [2]:

$$\sigma_\tau^2 \geq \frac{1}{SNR_{AR}(2\pi\Delta f_{rms})^2}, \quad (2)$$

где Δf_{rms} – среднеквадратическая ширина спектра сигнала. Для гауссова импульса второго порядка с эффективной полосой Δf справедливо $\Delta f_{rms} \approx \Delta f / 2$. Тогда теоретическая зависимость RMSE от *M*:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\sqrt{M}\pi\Delta f\sqrt{SNR_0}}. \quad (3)$$

Цель работы – проверить справедливость этой зависимости в условиях дискретизации и конечной длительности сигнала, а также определить минимальное *M*, при котором достигается $\sigma_\tau \leq 0{,}1$ нс (ошибка по дальности ≤ 3 см) для типовых параметров СШП-связи [3].

Проведено имитационное моделирование в среде Python. Параметры: центральная частота f_c = 5 ГГц, полоса Δf = 1 ГГц (длительность импульса ~ 1 нс), частота дискретизации 20 ГГц. Значения *M*: 1,2,4,8,16. Для каждого *M* и фиксированного SNR_0 (5 дБ и 10 дБ) выполнено 500 независимых реализаций. Оценка *TOA* производилась по положению максимума взаимной корреляции между принятым сигналом после когерентного суммирования и копией зондирующего импульса. Вычислялась эмпирическая *RMSE* [4].

При SNR_0=5 дБ получены следующие значения *RMSE*(τ):

- *M* = 1: 0,35 нс (10,5 см по дальности);
- *M* = 2: 0,25 нс (7,5 см);
- *M* = 4: 0,17 нс (5,1 см);
- *M* = 8: 0,12 нс (3,6 см);
- *M* = 16: 0,09 нс (2,7 см).

Отношение RMSE(1)/RMSE(16) = 3,9, что хорошо согласуется с теоретическим значением 4,0 ($\sqrt{16}$ = 4). При SNR_0 = 10 дБ RMSE(τ) при *M* = 8 составляет 0,08 нс (2,4 см), что уже лучше целевого порога 0,1 нс. Таким образом, для достижения ошибки ≤ 0,1 нс при SNR_0 = 5 дБ требуется *M* ≈ 14…16, а при SNR_0 = 10 дБ достаточно *M* = 8.

Выявленная зависимость $\sigma_\tau \propto 1/\sqrt{M}$ совпадает с *CRLB* при условии отсутствия взаимной связи между элементами и идеальной калибровки. Однако при *M* > 16 в реальных системах начинают сказываться эффекты взаимного влияния, а также шумы квантования и погрешности синхронизации каналов, что ограничивает практический выигрыш. Поэтому для большинства применений оптимальным является диапазон *M* = 8…16.

Количественно показано, что увеличение числа элементов СШП *AP* в *K* раз уменьшает ошибку измерения ТОА (и, следовательно, дальности) в $\sqrt{K}$ раз. Для точности позиционирования 3 см при умеренном ОСШ (5 дБ на элемент) необходима решетка из 14 – 16 элементов; при лучшем ОСШ достаточно 8 элементов. Результаты могут служить основой для выбора конфигурации *AP* в гибридных системах связи и локации.

Библиографический список

1. Петров, Б. М. Широкополосные антенны и антенные решетки / Б. М. Петров, Г. Г. Шишкин – М. : Радио и связь, 1995.

2. Kay, S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory / S. M. Kay. – Prentice-Hall, 1993.

3. Слюсар, В. И. Технологии Massive MIMO: новые горизонты эффективности / В. И. Слюсар // Электросвязь. – 2020. – № 11. – С. 16 – 21.

4. Антенная решетка на основе широкополосной планарно-щелевой антенный с экспоненциальным изменением ширин щели для систем беспроводного широкополосного доступа / О. А. Белоусов, Р. Ю. Курносов, П. А. Горшков, А. Г. Рязанова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2015. – № 2(56). – С. 184 – 194.

МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЛУЧА В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ ДЛЯ СИСТЕМ 5G/6G

Р. Д. Карих

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: KarikhRD@yandex.ru)

В сверхширокополосных системах возникает фундаментальное физическое ограничение, известное как эффект «растягивания луча» (beam squint). Он заключается в том, что традиционные фазовращатели, используемые в фазированных антенных решетках (ФАР), обеспечивают постоянный фазовый сдвиг только для одной частоты (центральной). Для частот, отличных от центральной, направление луча отклоняется, что приводит к искажению диаграммы направленности и потерям энергии сигнала. Таким образом, классические методы формирования луча, успешно работавшие в узкополосных системах, требуют кардинального пересмотра для применения в 5G/6G.

Целью данной работы является выявление методов адаптивного формирования луча, позволяющих преодолеть эффект beam squint и обеспечить высокую энергоэффективность в сверхширокополосных антенных решетках перспективных систем связи.

Гибридное формирование луча (Hybrid Beamforming, HBF). Гибридное формирование луча является доминирующим подходом в современных системах 5G mmWave и рассматривается как базовый для 6G. Суть метода заключается в разделении обработки сигнала на два этапа: аналоговый (в РЧ-области) и цифровой (в основной полосе частот). Это позволяет использовать значительно меньшее количество РЧ-трактов (цифро-аналоговых преобразователей, усилителей, смесителей) по сравнению с числом антенных элементов [1].

Фотонные системы формирования луча на базе истинных линий задержки (True-Time Delay, TTD). Использование технологий микроволновой фотоники для реализации TTD открывает новые возможности. Фотонные гибридные архитектуры с программируемыми линиями задержки, выполненными на фотонных интегральных схемах (PIC), позволяют не только устранить beam squint, но и значительно повысить спектральную эффективность. Например, при использовании 16 антенных элементов и 8 РЧ-трактов предложенная фотонная система демонстрирует спектральную эффективность, в пять раз превышающую показатели традиционных гибридных аналогов при отношении сигнал/шум 25 дБ. Это достигается за счет низких потерь в фотонных схемах и возможности точной настройки задержек. Кроме того, фотонные системы обладают высокой устойчивостью к электромагнитным помехам и позволяют снизить массогабаритные показатели аппаратуры [2].

Архитектуры с переключением (Switch-Based Beamforming). Дальнейшим упрощением аппаратной части является отказ от непрерывного управления фазой или задержкой в пользу дискретного переключения. В архитектурах с переключением антенные элементы или подрешетки подключаются к РЧ-трактам через матрицу высокочастотных коммутаторов. Такие системы не обеспечивают плавного сканирования луча, но позволяют формировать заранее определенные направления.

Этот подход находит применение в безъячеечных (Cell-free) массивных MIMO-системах, где множество точек доступа (AP) координируют свою работу для обслуживания пользователей. Исследования показывают, что оптимальная конфигурация подрешеток (например, размер и способ подключения антенн) в таких архитектурах критически влияет на итоговую спектральную эффективность системы. Энергоэффективность здесь достигается за счет минимального энергопотребления самих коммутаторов по сравнению с активными фазовращателями и линиями задержки [3].

Таким образом можно сказать что не существует единого универсального метода адаптивного формирования луча для всех сценариев 5G/6G. Выбор архитектуры и алгоритма зависит от рабочего диапазона частот, типа терминалов и требований к энергопотреблению.

Библиографический список

1. Применение ультраширокополосных излучателей в системах радиосвязи шестого поколения / А. А. Тришаков, А. О. Смирнов, Д. А. Караваев и др. // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы

VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – 2021. – С. 83–84.

2. Синтез излучателя для сетей беспроводного широкополосного доступа на основе замедляющих электродинамических структур / А. Ю. Дмитриевцев, О. А. Белоусов, М. А. Кудряшов и др. // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2021. – Т. 4, № 3. – С. 36 – 45.

3. Богданов, А. А. Применение методов машинного обучения для управления радиоресурсами в беспроводных сетях 5G / А. А. Богданов, С. П. Федосов, А. Ю. Цветков // Вестник связи. – 2021. – С. 34 – 40.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СТАНДАРТОВ ЦИФРОВОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

В. А. Ким, М. С. Пащенко

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: kim.valek@dvfu.ru, pashchenko.ms@dvfu.ru)

В настоящее время наблюдается активный переход от аналоговых систем к цифровым технологиям профессиональной подвижной радиосвязи (ППР). Цифровые стандарты обеспечивают лучшее качество передачи голоса, повышенную защиту от несанкционированного доступа, эффективное использование частотного ресурса и возможность передачи данных. Ниже рассмотрены наиболее распространенные открытые стандарты:

– DMR (Digital Mobile Radio) – открытый протокол, утвержденный ETSI в 2005 г. Использует двухслотовый TDMA в канале 12,5 кГц [1];

– TETRA (Terrestrial Trunked Radio) – европейский стандарт транкинговой связи (ETSI), обеспечивает высокую защищенность и оперативное установление соединения [2];

– NXDN (Nexedge) – стандарт, разработанный компаниями Icom и Kenwood, работающий в каналах 6,25 или 12,5 кГц; в 2017 г. признан Международным союзом электросвязи (МСЭ) [3];

– APCO Project 25 (P25) – стандарт для служб общественной безопасности США, поддерживает FDMA и TDMA [4].

В России ведутся работы по созданию национальных стандартов ППР. Первым результатом стало утверждение ГОСТ Р 71586, вступившего в силу в 2025 году. К 2029 г. государственные структуры должны перейти на отечественную платформу на основе доработанного стандарта DMR. Новый российский стандарт предусматривает использование отечественных алгоритмов аутентификации и технического маскирования информации, а также обеспечивает требования системы оперативно-розыскных мероприятий (СОРМ) [5].

Современные стандарты цифровой радиосвязи представляют собой широкий спектр технологий, ориентированных на различные области применения – от малого бизнеса до критически важных государственных сетей. Их объединяет использование цифровой обработки сигналов, продвинутых

методов модуляции и помехоустойчивого кодирования, обеспечивающих высокое качество связи и эффективное использование частотного спектра [6]. Выбор конкретного стандарта зависит от требуемой зоны покрытия, абонентской емкости, потребностей в защите информации и экономической целесообразности.

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики данных стандартов.

1. Характеристики стандартов цифровой ППР

Параметр	DMR	TETRA	NXDN	APCO P25	ГОСТ Р 71586.1–2024
Разработчик	ETSI	ETSI	Icom, Kenwood (одобрен МСЭ)	APCO (США)	Росстандарт (НИЦ Телеком)
Метод разделения каналов	TDMA (2 слота)	TDMA (4 слота)	FDMA	FDMA/TDMA	TDMA (2 слота)
Ширина канала	12,5 кГц	25 кГц	6,25/12,5 кГц	12,5 кГц	12,5 кГц
Скорость передачи данных	до 9,6 кбит/с	до 28,8 кбит/с	до 9,6 кбит/с	до 12 кбит/с	до 9,6 кбит/с
Основное применение	Коммерческая связь, логистика, предприятия, ЖКХ	Силовые структуры, транспорт, общественная безопасность	Гостиничный бизнес, сельское хозяйство, охранные системы	Полиция, пожарные, скорая помощь, спецслужбы (США)	Госструктуры РФ, импортозамещение
Преимущества	Низкая стоимость оборудования, простота развертывания, широкая совместимость	Высокая защищенность, транкинг	Высокая спектральная эффективность	Высокая надежность, открытость	Отечественная криптозащита, совместимость с DMR, соответствие СОРМ
Недостатки	Небольшая дальность	Сложная инфраструктура	Малая распространенность	Высокая стоимость оборудования	Новый, экосистема формируется

Библиографический список

1. ETSI TS 102 361-1 V2.4.1 (2016). Digital Mobile Radio (DMR) Systems. Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol. – Sophia Antipolis: ETSI, 2016. – 324 с.

2. ETSI EN 300 392-1 V2.4.1 (2018). Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Voice plus Data (V+D). Part 1: General network design. – Sophia Antipolis: ETSI, 2018. – 178 с.

3. Рекомендация МСЭ-R M.2014-2 (2021). Цифровые системы наземной подвижной связи для профессионального использования. – Женева : ITU, 2021. – 60 с.

4. APCO Project 25 (P25). ANSI/TIA-102 Series Standards for Public Safety Digital Radio. – Arlington: APCO, 2019. – 412 с.

5. ГОСТ Р 71586.1–2024. Цифровая профессиональная подвижная радиосвязь. Общие положения. Режим прямой конвенциональной связи абонентских станций. – Введ. 2025-02-01. – М. : Российский институт стандартизации, 2024. – 45 с.

6. ГОСТ Р 54719–2011. Системы подвижной радиосвязи цифровые профессиональные. Основные параметры и общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2012. – 28 с.

ЗАКРЫТАЯ ТЕМ-КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Е. Г. Клепова, А. М. Полунина, А. С. Визовитин, В. В. Глотов

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
(e-mail: vadik-livny@mail.ru)

ТЕМ-камера – это экранированная замкнутая структура, в которой распространяется поперечная электромагнитная волна. Сочетание широкополосности, высокой точности и защищенности от внешних полей обуславливает ее востребованность в измерительной практике и стимулирует дальнейшие исследования, направленные на совершенствование подобных устройств [1]. ТЕМ (Transverse Electromagnetic Mode) – режим распространения электромагнитных волн, при котором электрические и магнитные поля перпендикулярны направлению распространения. Камера ТЕМ состоит из прямоугольного коаксиального отрезка, который служит широкополосным линейным фазовым и амплитудным преобразователем (он преобразует напряженность поля в радиочастотное напряжение или радиочастотное напряжение в напряженность поля) либо для создания стандартных электромагнитных полей для испытаний на восприимчивость электронного оборудования, либо для обнаружения излучений от радиоэлектронного оборудования.

ТЕМ-камера представляет собой прямоугольную коаксиальную линию передачи с сопротивлением 50 Ом, сужающуюся на каждом конце. Центральный проводник, как показано на рис. 1, выполнен в форме плоской металлической пластины, которая размещена в центре корпуса камеры. Для сохранения центрального расположения и геометрии поперечного сечения используются диэлектрические стержни с низкими потерями. Доступ в камеру осуществляется через герметичную боковую дверцу. По периметру дверцы предусмотрены токопроводящие уплотнители, которые обеспечивают непрерывность экрана и электромагнитную герметичность камеры.

Основным преимуществом использования ТЕМ-камеры является линейность фазо-частотной характеристики и постоянство амплитуды поля по частоте в пределах рабочего диапазона, где распространяется только основная волна. Это свойство обеспечивает возможность тестирования оборудования импульсными сигналами сложной формы без внесения фазовых и амплитудных иска-

жений. По мере повышения частоты, геометрические размеры поперечного сечения камеры начинают превышать половину длины волны. В этом случае в ячейке, помимо основной ТЕМ-волны, могут возникать высшие типы волн (ТЕ и ТМ волны). Появление резонансов высших порядков нарушает однородность поля и линейность преобразования, что является основным фактором, ограничивающим верхнюю границу рабочего диапазона частот. Именно поэтому проблема подавления высших волн и расширения рабочего диапазона ТЕМ-камер в сторону высоких частот является одной из наиболее актуальных задач современной измерительной техники.

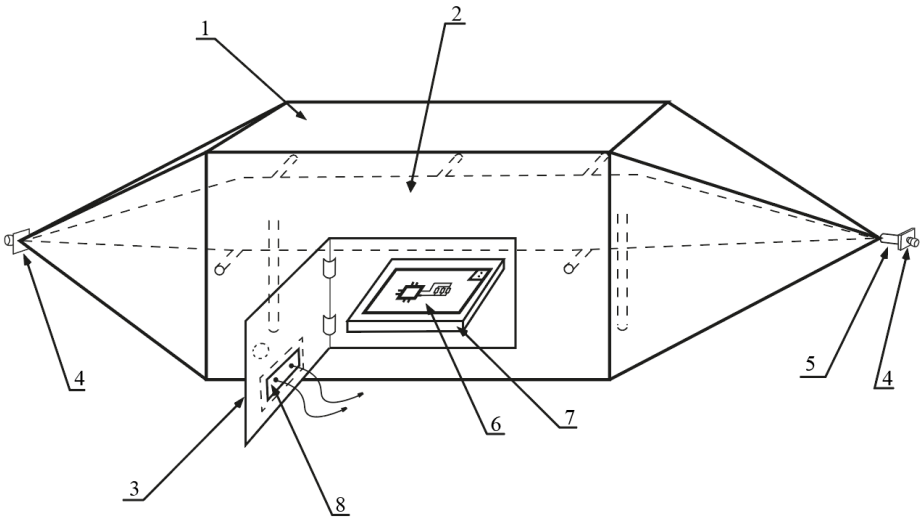


Рис. 1. ТЕМ-камера:
1 – внешний экран; *2* – перегородка (внутренний проводник); *3* – дверца для доступа; *4* – коаксиальный разъем; *5* – нагрузка 50 Ом; *6* – тестируемое устройство; *7* – диэлектрическая подложка; *8* – эквивалент проводки

Библиографический список

1. Ромащенко, М. А. Использование искусственных нейронных сетей для оценки воздействия электромагнитных помех / М. А. Ромащенко, Д. В. Васильченко, С. Ю. Белецкая // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 8. – С. 21 – 27.

МЕДИАПЛАНИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ МЕДИАСИСТЕМЕ: ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

А. Н. Кольтюков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: alexeykoltyukov@rambler.ru)

Медиапланирование – это выбор конкретных средств распространения рекламы, времени, места выхода рекламных объявлений, их размера, длительности, количества, составление календарных графиков выхода рекламных объявлений на основе анализа структуры и размеров аудиторий средств рекламы [2, с. 277].

В современной теории маркетинговых коммуникаций принято выделять два основных типа рекламной деятельности: ATL (Above the Line) и BTL (Below the Line). К ATL-коммуникациям традиционно относят прямую рекламу в средствах массовой информации (телевидение, радио, пресса, наружная реклама, интернет), а под BTL-коммуникациями понимают комплекс мероприятий, направленных на стимулирование сбыта, прямой маркетинг, специальные события (событийный маркетинг), промо-акции, мерчандайзинг и внутримагазинную рекламу. Современным маркетинговым коммуникациям свойственен баланс в виде TTL (Through the Line). Инструментарий TTL-маркетинга нацелен на формирование бесшовного взаимодействия за счет сочетания каналов прямого (массового) и непрямого (стимулирующего) воздействия. TTL в целом символизирует современную медиаэпоху, когда эффективное продвижение начинается с веб-рекламы – будь то социальные медиа или SEO.

Именно TTL преобладает в региональном медиапланировании. Региональная медиасреда не настолько насыщена и не располагает такими большими бюджетами, как федеральная медиасреда, поэтому малый бизнес вынужден избирательнее подходить к разработке медиаплана. Кроме того, исследования ВЦИОМ и ФОМ показывают, что уровень доверия к региональным СМИ в вопросах местной повестки выше, чем к центральным. Это доверие частично переносится и на рекламу [3].

Для небольших начинающих бизнесов оптимальным будет начать с интернет-рекламы, периодически подкрепляя ее традиционными ATL-каналами вроде телевидения или радио. Типизируем региональный бизнес:

- Стартап или микробизнес (до 12 месяцев): бюджет до 50…100 тыс. руб./мес. Приоритет – таргетированная реклама в соцсетях («ВКонтакте», Telegram-каналы города), SEO, контекстная реклама на региональные запросы. ATL – только точечно (радио в час пик).
- Устоявшийся бизнес «со стажем»: уже имеются наработанные связи с ТВ, прессой, наружной рекламой. Переход на TTL происходит медленно, но неизбежно из-за ухода аудитории в онлайн. Например, мебельный центр «Юнион» в Тамбове давно является партнером региональных телеканалов, закупая рекламные блоки.
- Сетевой/франчайзинговый бизнес: использует федеральную медиастратегию с локальной привязкой (например, региональная вставка на телевидении, гео-таргетинг в Яндексе). Например, «Самокат», «Магнит», «Пятерочка».

Потапов П. Ф., Ржанов А. А. отмечают, что в каждом регионе существуют свои особенности телевизионной рекламы и медиапланирования. Основная работа ведется со средними и мелкими рекламодателями. Практика показывает, что качественное медиапланирование позволяет сэкономить в среднем 30% рекламного бюджета (или соответственно увеличить известность бренда, лояльность потребителей и, в конечном счете, объем продаж) [1, с. 72].

Практический алгоритм достижения заявленной экономии рекламного бюджета (до 30%) включает несколько последовательных этапов. На первом

этапе проводится анализ целевой аудитории, ее возрастной структуры, предпочитаемых источников новостей и временной активности в медийном пространстве. Например, зрители старше 35 лет вероятнее всего увидят рекламу утром во время регионального телеблока или услышат ее за рулем автомобиля. Второй этап предполагает инвентаризацию региональных медиа, которая не ограничивается традиционным телевидением, радио и прессой, а охватывает городские сообщества в социальных сетях. Третий этап связан с расчетом базовых медиапоказателей: охвата (Reach), частоты (Frequency) и стоимости за тысячу контактов (CPT); особенно значимым показателем для региональной кампании становится CPT, скорректированный по географическому принципу. Четвертый этап заключается в составлении календарного медиаплана, который учитывает сезонность локального спроса. Например, реклама выставки рыбы накануне Нового года. Завершающий этап алгоритма – проведение A/B-теста, в ходе которого на ограниченном бюджете сравнивают эффективность двух разных каналов (например, регионального радио и таргетированной рекламы во «ВКонтакте»). Это позволяет выбрать наиболее эффективный инструмент перед масштабированием кампании.

Также важно учитывать недостатки регионального медиапланирования. Во-первых, недостаточная измеримость – не все региональные медиа способны предоставить достоверную статистику охватов. Во-вторых, ограниченность предложения – в небольшом городе часто присутствуют лишь один-два реально эффективных канала коммуникации. В-третьих, неправильное распределение ролей – региональный рекламодатель нередко сам выполняет функции медиапланера, что ведет к систематическим ошибкам в выборе оптимальной частоты контакта с целевыми потребителями. Наконец, на региональном рынке высока конкуренция за локальные эфирные окна прайм-тайма – например, утренние часы на радио, когда цена размещения может необоснованно расти при ограниченных бюджетных ресурсах.

Медиапланирование в регионах предполагает разработку особой медиастратегии, включающей комплекс действий, направленных на поиск наиболее эффективного размещения рекламных и мультимедийных посланий в средствах массовой информации. Подход TTL становится доминантным, но с определенными оговорками: для старшей аудитории эффективными остаются традиционные каналы ATL, а для BTL-сегмента важны акции непосредственно в местах продаж. Достижение поставленных целей рекламной кампании и оптимизация расходов при размещении рекламных материалов зависят от выбора соответствующей медиатактики. [2, с. 284]

Библиографический список

1. Потапов, П. Ф. Роль медиапланирования в практике регионального телевещания / П. Ф. Потапов, А. А. Ржанов // Журналистский ежегодник. – 2015. – № 4. – С. 72. – URL : https://journals.tsu.ru/uploads/import/1357/files/04-071.pdf (дата обращения: 05.05.2026).

2. Радькова, Н. О. Теоретические аспекты медиапланирования // Транспортное машиностроение. – 2016. – № 5(53). – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-mediaplanirovaniya (дата обращения: 04.05.2026).

3. Региональные сайты в медиапланировании: когда локальные площадки дают больше, чем федеральные // Мир рекламы Digital. – URL : https://digital.reklamy.ru/regionalnie_saiti_v_mediaplanirovanii (дата обращения: 05.05.2026).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ ЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Н. А. Колядин, О. Н. Попов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: popov_oleeg@mail.ru)

Полимеры и композиты на их основе широко применяют в различных отраслях промышленности. Физическая структура полимеров характеризуется взаимным расположением макромолекул и их частей, в частности, кристаллической и аморфной структурами. Практическое использование полимерных материалов (ПМ) невозможно без глубокого изучения суперпозиций их состояний и переходов, информация о которых необходима для назначения технологических режимов их переработки и определения условий эксплуатации изделий [1].

Контроль температурного распределения в ПМ осуществляли с использованием зондового метода, позволяющего осуществлять тепловое воздействие с постоянной мощностью от двух нагревателей в виде узкой полосы каждый [2, 3]. В ходе эксперимента термоприемниками фиксируется зависимость избыточной температуры T поверхности полимера от времени: один термоприемник расположен на центральной оси контактной поверхности измерительного зонда (ИЗ) между нагревателями, два других находятся на осях нагревателей.

На рисунке 1 представлены зависимости $T = f(\tau)$, полученные в ходе проведения эксперимента на изделии из полиамида (ПА6).

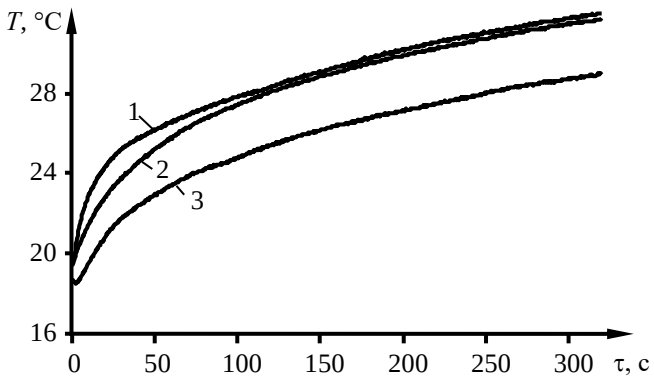


Рис. 1. Зависимости $T = f(\tau)$, зафиксированные на изделии из ПА6:
1, 2 – на нагревателях *1* и *2*; *3* – на центральной оси контактной поверхности ИЗ между осями нагревателей

Эксперименты проводились при мощности на нагревателях P_1 = 0,79 Вт и P_2 = 0,68 Вт с временным шагом измерения температуры $\Delta\tau$ = 0,3 с. Начальная температура опыта $T_н$ = 17°С, толщина исследуемого изделия 18,5 мм.

На рисунке 1 представлены термограммы *1* и *2*, зафиксированные термоприемниками на центральных осях нагревателей. Термограмма *3* зафиксирована на центральной оси контактной поверхности ИЗ.

Для расчета текущих значений теплофизических свойств термограмму *3*, полученную экспериментально, пошагово разделили на интервалы с номерами точек 1, …, *k*; 2, …, *k* + 1; *n* – *k* + 1, …, *n*, где *k* – количество точек в интервале (целое нечетное положительное число *k* > 3); *n* – количество точек в термограмме; *i* – номер интервала (целое число *i* = 1, …, *n* – *k*).

Текущие значения теплофизических свойств по каждому интервалу:

$$\lambda_i^* = \frac{\alpha}{b_{1i}}; \tag{1}$$

$$a_i^* = \sqrt{\exp\left[\frac{b_{0i}}{b_{1i}} - \beta\right]}; \tag{2}$$

$$b_{1i} = \frac{\sum_{j=i}^{i+(k-1)} T_j\,(z_j - z_i)}{\sum_{j=i}^{i+(k-1)} (z_j - z_i)^2}; \tag{3}$$

$$b_{0i} = T_s - b_{1i}\bar{z}_i; \tag{4}$$

$$\bar{z}_i = \frac{1}{k}\sum_{j=i}^{i+(k-1)} z_j; \tag{5}$$

$$T_s = \frac{1}{k}\sum_{j=i}^{i+(k-1)} T_j\ , \tag{6}$$

где λ – теплопроводность полимерного материала; *a* – температуропроводность полимерного материала; α, β – постоянные прибора; T_s – среднее значение температуры из *k* измерений в каждом интервале; T_j – температура на *j*-м шаге измерения; $z_j = \ln[\tau_j^2]$; b_{1i}, b_{0i} – текущие значения коэффициентов b_1 и b_0, определенные из термограмм, снятых на исследуемом ПМ и стандартном образце.

По термограмме 3 (рис. 1), полученной на изделии из ПА6, построены зависимости $\lambda_i^* = f(T_s)$ и $a_i^* = f(T_s)$.

Твердофазный переход в ПА-6 зафиксирован при температуре $T_п$ = 25,6°С на зависимости $\lambda_i^* = f(T_s)$ (рис. 2, *а*). На зависимости $a_i^* = f(T_s)$ (рис. 2, *б*) фазовый переход проявился при $T_п$ = 25,3°С, а релаксационный – при $T_п$ = 27,8°С. Полученные результаты согласуются с литературными данными [4].

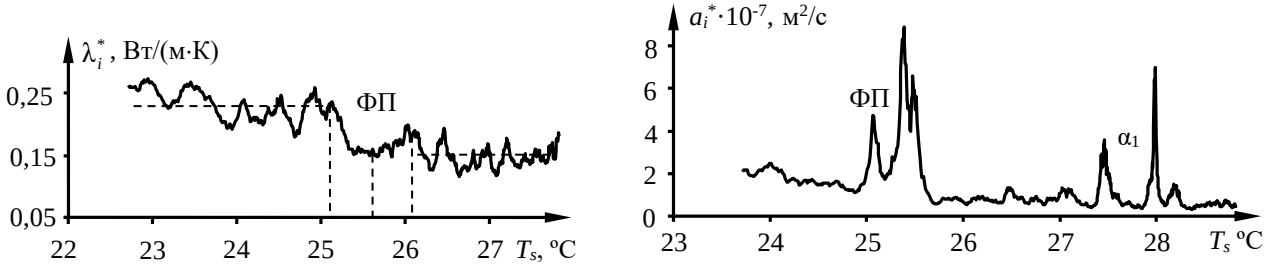


Рис. 2. Зависимости:
$а - \lambda_i^* = f(T_s)$; $б - a_i^* = f(T_s)$

Библиографический список

1. Производство изделий из полимерных материалов / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко; под общ. ред. В. К. Крыжановского. – СПб. : Профессия, 2008. – 460 с.

2. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / С. В. Мищенко, Ю. Л. Муромцев, Н. П. Жуков и др. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 110 с.

3. Метод и измерительная система теплового неразрушающего контроля структурных переходов в полимерных материалах / О. Н. Попов, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, А. Н. Грибков. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – 144 с.

4. Бартенев, Г. М. Релаксационные свойства полимеров / Г. М. Бартенев, А. Г. Бартенева. – М. : Химия, 1992. 384 с.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЛЕДА» ОТ БЕСПРОВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. С. Коршунова, К. А. Закиров, М. М. Смирнова

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: korshunova.vs@dvfu.ru)

С распространением беспроводных технологий электромагнитная обстановка офисных рабочих мест приобрела нестационарный характер. Точки доступа Wi-Fi, Bluetooth-гарнитуры, смартфоны и ноутбуки создают радиочастотное излучение, интенсивность которого меняется в широких пределах в зависимости от режима работы устройств: во время видеоконференции или массовой передачи данных уровень поля резко возрастает. Такая переменчивость остается наименее изученной: в рамках специальной оценки условий труда, как правило, ограничиваются единичными замерами, не отражающими динамику воздействия на протяжении рабочего дня [1].

Действующие нормы устанавливают предельно допустимые уровни электромагнитного поля отдельно для каждого частотного диапазона, причем ряд

показателей нормируется с учетом времени воздействия. Это означает, что для корректной гигиенической оценки необходим временной ряд уровней поля за весь рабочий день, а не моментальное значение. В настоящей работе предлагается алгоритм формирования суточного «электромагнитного профиля» рабочего места методами моделирования.

Под суточным «электромагнитным профилем» рабочего места понимается многоканальный временной ряд значений уровней электромагнитного поля, охватывающий все нормируемые частотные диапазоны на протяжении рабочего дня с шагом 15 мин, получается 32 временных отсчета за восемь часов. Каждое значение в ряду представляет собой нормированный уровень поля в контрольной точке: измеренная или расчетная напряженность поля делится на предельно допустимый уровень (ПДУ) для данного частотного диапазона согласно СанПиН 1.2.3685-21 [1]. Такое нормирование приводит поля разной физической природы к единому безразмерному масштабу и позволяет непосредственно сопоставлять вклады источников различных диапазонов. В профиль включаются три частотных канала: сверхнизкочастотный (5…2000 Гц) – питающая сеть и блоки питания; диапазон 2,4 ГГц – Wi-Fi и Bluetooth; диапазон 5 ГГц – Wi-Fi [2].

Алгоритм включает четыре последовательных шага. Первый – построение геометрической модели офисного кабинета: план помещения с указанием координат рабочих мест, перегородок и каждого источника излучения. Каждому источнику назначается тип, мощность или напряженность поля на опорном расстоянии, рабочий частотный диапазон и диаграмма направленности. Второй шаг – назначение временного расписания активности для каждого источника. Активность описывается безразмерным коэффициентом от нуля до единицы с шагом 15 мин: значение, близкое к единице, соответствует интенсивной работе устройства, близкое к нулю – режиму ожидания. Например, точка доступа Wi-Fi имеет высокую активность в периоды видеоконференций и низкую во время обеденного перерыва [1].

Третий шаг – расчет уровня поля в контрольной точке для каждого момента времени. Вклады всех источников суммируются раздельно по каждому частотному каналу. Для источников диапазонов 2,4 и 5 ГГц используется модель потерь на трассе внутри помещения, соответствующая Рекомендации МСЭ-R P.1238-11: уровень поля рассчитывается как функция расстояния и несущей частоты с учетом типа помещения и потерь в перегородках [2]. Четвертый шаг – вычисление итогового нормированного профиля и сводных показателей нагрузки: максимального нормированного уровня по каждому частотному каналу за день и суточной энергетической экспозиции, которая представляет собой сумму квадратов нормированных уровней по всем временным отсчетам. Последний показатель характеризует накопленную за день нагрузку и допускает прямое сравнение с нормируемыми величинами [3].

Результатом будет многоканальный временной график нормированных уровней поля для всех частотных диапазонов на одной оси времени. На графике

горизонтальными линиями отмечены предупредительный уровень (половина ПДУ) и предельный уровень (ПДУ), что позволяет мгновенно оценить запас до нормы в любой момент дня. Второй формат – тепловая карта в координатах времени суток и частотного канала, где интенсивность закраски отражает нормированный уровень поля. Сравнение нескольких вариантов расстановки оборудования в рамках одной модели позволяет еще на этапе проектирования выбрать конфигурацию с наименьшей суточной электромагнитной нагрузкой на рабочих местах.

Библиографический список

1. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М. : Роспотребнадзор, 2021. – 496 с.
2. Рекомендация МСЭ-R P.1238-11. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зоновых радиосетей в диапазоне частот 300 МГц – 450 ГГц. – Женева : МСЭ, 2021. – 62 с.
3. ГОСТ Р 51317.2.5–2000 (МЭК 61000-2-5-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. – М. : Стандартинформ, 2001. – 27 с.

СПУТНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

С. А. Косоротова, В. С. Чувилькин

Многопрофильный колледж при Тамбовском государственном техническом университете, Тамбов, Россия
(e-mail: skosorotova98@gmail.com; vadim_chuvilkin@mail.com)

Спутниковые технологии – это технологии беспроводной передачи информации, основанные на использовании космических аппаратов, находящихся на орбите Земли. Такие устройства выступают в роли ретрансляторов сигнала.

Для изучения спутниковых технологий ученые создают *макеты*. Благодаря таким макетам, представленным на выставках и форумах, простые обыватели могут рассмотреть конструкцию вблизи, понять как работает прибор для исследования космоса.

Роскосмос – это российская государственная корпорация, созданная в 2015 году для управления космической отраслью. Она обеспечивает реализацию государственной политики, производит ракетно-космическую технику, запускает аппараты, развивает систему ГЛОНАСС и курирует работу космодромов. Различные аспекты:

- Пилотируемая космонавтика
- Орбитальные группировки
- Космодромы

«*Электро-Л*» *5*

- Этот спутник станет частью уже существующей группировки «Электро».
- Предназначен для мониторинга климатических и атмосферных условий на планете.
- Был выведен на геостационарную орбиту, расположенную примерно на высоте 35 850 километров над уровнем Земли.

«*Аист-2Т*»

- Будут использоваться для создания стереоскопической трехмерной модели нашей планеты.
- Эти аппараты будут способны формировать 3D-модель Земли с максимальным разрешением 1,2 м.
- Вес 670 кг.
- Гарантированный срок работы в 5 лет.

«*Экспресс-АМУ4*»

- Создан для обеспечения широкого спектра услуг спутниковой телекоммуникации.
- Вес – около 2 т.
- Этот спутник будет иметь размах солнечных панелей около 8 м в разложенном виде.
- Мощность будет составлять примерно 6000…6500 Вт.
- Гарантированный срок службы – 15 лет.
- Ожидается, что «Экспресс-АМУ4» сможет предоставлять услуги связи не только в России, но и за ее пределами, включая Латинскую Америку, Африку, Ближний Восток и даже Европу.
- Будет работать в Ku-, C- и L-диапазонах – частотных диапазонах, используемых в спутниковой связи. Каждый из них имеет свои особенности и применяется для разных задач.
- Спутник будет находиться на геостационарной орбите в точке стояния 11 градусов западной долготы. Космическому аппарату «Экспресс-АМУ4» предстоит функционировать на геостационарной орбите высотой около 35 900 км не менее 15 лет.
- В составе космической платформы – 100% отечественных приборов. По информации на октябрь 2024 года, в производстве компонентов для спутника «Экспресс-АМУ4» задействованы 30 российских предприятий, которые изготавливают для аппарата 1,1 тыс. элементов.
- Запуск на геостационарную орбиту запланирован на декабрь 2026 года, а его ввод в эксплуатацию намечен на март 2027 года.

Библиографический список

1. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» / Реализация проекта «Экспресс-АМУ4» [Электронный ресурс] / АО «Решетнев». – URL : https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-040225

2. Буймова, Д. П. «Ростех» начал поставки аппаратуры для отечественного спутника связи [Электронный ресурс] / Д. П. Буймова // РИА Новости. – 2024. 12 мая. – URL : https://ria.ru/20240527/rostekh-1948522990.html

3. Ермолаев, В. И. Спутниковая платформа «Экспресс-1000» : учебное пособие / В. И. Ермолаев ; под ред. В. А. Бабука, Н. А. Тестоедова // Лань: электронно-библиотечная система. – СПб. : БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2015. – 67 с. – URL : https://e.lanbook.com/book/75161.

4. Роскосмос / Спутник рождается в Сибири [Электронный ресурс] / Роскосмос. – URL : https://www.roscosmos.ru/37975/

5. Пугачев, О. И. Спутниковые технологии связи, интернета и телевидения : методические указания / О. И. Пугачев, К. Н. Фазилова // Лань: электронно-библиотечная система. – М. : РТУ МИРЭА, 2024. – 23 с. – URL : https://e.lanbook.com/book/448862

6. Берикашвили, В. Ш. Основы радиоэлектроники: системы передачи информации : учебник для среднего профессионального образования / В. Ш. Берикашвили // Образовательная платформа Юрайт. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2026. – 105 с. – (Профессиональное образование). – URL : https://urait.ru/bcode/587273

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ПРОВОДНЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ: ОБЗОР ОСНОВНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Д. К. Кочнев, Н. С. Кутырев

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: kochnev.dk@dvfu.ru; kutyrev.ns@dvfu.ru)

В настоящее время производство невозможно представить без распределенных систем управления, объединяющих сотни датчиков, исполнительных механизмов и контроллеров. Надежная передача данных между этими элементами опирается преимущественно на проводные интерфейсы.

Базовым уровнем организации промышленных сетей являются последовательные интерфейсы, реализующие физический и канальный уровни модели OSI [1].

Интерфейс RS-485 использует дифференциальную передачу сигнала по витой паре. Основной средой передачи данных является витая пара.

Преимущества:

1. Помехоустойчивость – внешние помехи наводятся на оба провода.
2. одновременно и подавляются как синфазный шум, что делает RS-485 надежным в условиях сильных электромагнитных помех.
3. Большая дальность – дифференциальная передача обеспечивает работу на расстоянии до 1200 метров со скоростью до 100 кбит/с.
4. Многоточечная топология – все узлы совместно используют одну среду передачи, что идеально для заводской автоматизации и полевых шин.

Недостатки:

1. Только полудуплекс – в любой момент времени передавать данные может лишь один узел, что снижает пропускную способность.
2. Коллизии – в многоточечных сетях два устройства могут попытаться передавать одновременно, что требует дополнительных механизмов управления доступом.
3. Устаревает на фоне Ethernet – протоколы на базе Ethernet доминируют в современных промышленных сетях.

Интерфейс CAN (Controller Area Network) – открытый сетевой протокол прикладного уровня, предназначенный для интеграции умных устройств в бортовые сети транспортных средств и промышленные коммуникационные сети [2].

Преимущества:

1. Помехоустойчивость и надежность – CAN использует дифференциальную передачу и встроенные механизмы обнаружения ошибок, что обеспечивает высокую устойчивость к электромагнитным помехам.
2. Низкое энергопотребление – контроллер CAN потребляет в 2,5 раза меньше энергии, чем Ethernet-контроллер в сопоставимых условиях.
3. Многомастерная архитектура – поддерживает управление с нескольких мастеров, быструю связь до 1 Мбит/с и закрытость сообщений.

Недостатки:

1. Компромисс между скоростью и дальностью – максимальная скорость 1 Мбит/с достигается лишь на расстоянии до 40 м;
2. Ограниченный объем данных в кадре – стандартный CAN передает лишь 8 байт в поле данных; CAN FD расширяет это до 64 байт.
3. Устаревает на фоне Ethernet – протоколы на базе Ethernet доминируют в современных промышленных сетях.

Интерфейс Modbus RTU – протокол прикладного уровня, реализующий архитектуру «ведущий-ведомый» в последовательных линиях связи (RS-232, RS-485). Является одним из наиболее распространенных открытых протоколов. Протокол поддерживает циклический обмен данными между ведущим и ведомыми устройствами с определенным временем отклика [1].

Преимущества:

1. Простота и низкая стоимость – Modbus RTU прост в реализации, требует минимальной настройки и не требует в дорогое сетевое оборудование.

2. Широкая совместимость – поддерживается всеми коммерческими системами SCADA, HMI, OPC-серверами и ПО для сбора данных.

Недостатки:

1. Низкая скорость передачи – традиционный Modbus RTU работает на скорости 9600–19200 бит/с, что может стать узким местом в системах, требующих частого обновления данных.

2. Ограниченные типы данных – протокол поддерживает только базовые типы: 16-битные регистры и дискретные входы/выходы.

В таблице 1 указаны основные характеристики данных протоколов.

1. Основные характеристики проводных протоколов

Протокол	Скорость	Дальность	Топология	Применение	Стандарт
RS-485	До 10 Мбит/с	1200 м	Шина	Датчики, энергетика, СКУД	EIA-485
CAN	До 1 Мбит/с	40 м	Шина	Транспорт, складская автоматика, машиностроение	ISO 11898
Modbus RTU	До 12 Мбит/с	1200 м	Шина	Сбор данных, управление насосами	IEC 61158

Библиографический список

1. Аристова, Н. И. И снова о промышленных сетях / Н. И. Аристова // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 7 – 11.

2. Краснов, М. В. Обзор интерфейсов передачи данных в системах автоматизации / М. В. Краснов, П. В. Нуромский, Е. Н. Яшин. – 2009.

РАДИОТЕХНИКА КАК ОСНОВА СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Р. Д. Крысанов, М. Е. Борисов

Многопрофильный колледж при Тамбовском государственном техническом университете, Тамбов, Россия
(e-mail: romkakrysanovkrysanog2000@gmail.com; borisov15012009@gmail.com)

Беспроводная передача данных базируется на радиотехнике – научной дисциплине, объясняющей рождение, распространение, прием и трансформацию электромагнитных сигналов. Без этих знаний невозможны ни сотовая связь, ни Wi-Fi, ни GPS, ни глобальный интернет.

- Антенно-фидерные элементы – физический интерфейс между устройством и радиоволной. Ключевой прорыв последних лет – технология MIMO (множество входов и выходов). Она используется в 4G, 5G и современных версиях Wi-Fi.

- Радиочастотный спектр ограничен, поэтому необходим метод ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM). Широкий канал дробится на множество узких подканалов, что дает высокую помехоустойчивость. OFDM лежит в основе 4G, 5G, Wi-Fi и цифрового ТВ.

В России за техническую совместимость отвечает технический комитет «Связь» (ТК 480) под эгидой Росстандарта, адаптирующий мировые нормы в национальные ГОСТ Р. Развитие мобильной связи от 1G до 6G – это радиотехнические скачки: от аналоговой передачи голоса (1G) через цифру, SMS и GPRS (2G), мобильный интернет до 42 Мбит/с (3G), полностью IP-сети до 1 Гбит/с (4G) к гиперсвязности 5G (до 20 Гбит/с, задержки <1 мс, интернет вещей) и терагерцовому диапазону с ИИ в 6G.

В российской спутниковой связи ключевые проекты:

1. Экспресс-АМУ4 АО Решетнев.
2. Поставки аппаратуры от Ростеха.
3. Платформа Экспресс-1000.
4. Данные Роскосмоса и методические указания по спутниковым технологиям.
5. Радиотехника остается базой телекоммуникационной индустрии.

Библиографический список

1. Берикашвили, В. Ш. Основы радиоэлектроники: системы передачи информации : учебник / В. Ш. Берикашвили // Образовательная платформа Юрайт. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2026. – 105 с. – URL : https://urait.ru/bcode/587273
2. ГОСТ Р 45.000–2019. Технический комитет «Связь» (ТК 480). Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2019. – URL : https://protect.gost.ru
3. Тихонов, В. И. Эволюция мобильной связи от 1G до 6G: радиотехнические скачки / В. И. Тихонов, Ю. П. Смирнов // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 3. – С. 12 – 29. – URL : http://jre.cplire.ru/jre/mar24/2/text.pdf

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ОБЗОР ПРОТОКОЛА УМНОГО ДОМА LORAWAN

Н. С. Кутырев[1], Д. К. Кочнев[2]

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: kutyrev.ns@dvfu.ru; kochnev.dk@dvfu.ru)

Стандарт LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks) начал формироваться в 2015 году. В январе того же года была создана некоммерческая организация LoRa Alliance для стандартизации и продвижения протокола.

В России национальный стандарт протокола LoRaWAN (LoRaWAN RU) был утвержден Росстандартом 22 декабря 2023 года, а вступил в силу 1 июля 2024 года.

При создании протокола LoRaWAN главной задачей инженеров было найти эффективный способ работы устройств интернет вещей на больших расстояниях при высокой автономности, но в качестве компромисса разработчики пожертвовали скоростью передачи данных и малыми задержками, по сравнению с протоколами, где на это делают упор (Wi-Fi, Zigbee). Один шлюз способен покрыть область, сравнимую с городским кварталом или же целый промышленный объект.

LoRaWAN наиболее эффективен при следующих сценариях [1]:

– датчики, расположенные в труднодоступных местах (подвал, чердак, уличные объекты, устройства за электромагнитными преградами);

– счетчики электроэнергии, водоснабжения и т.п., способные автоматически передавать показания;

– охранные датчики, должны работать стабильно при наличии различных помех;

– датчики и сенсоры, не требующие мгновенной реакции, но обязанные работать годами без замены батарей.

Технические характеристики и сравнение с популярными протоколами представлены в табл. 1.

1. Технические характеристики LoRaWAN и сравнение с Zigbee и Z-Wave [2, 3]

Параметр	LoRaWAN	Zigbee	Z-Wave
Дальность (м)	2000…15 000	10…100	30…100
Срок службы батареи (лет)	5…10	2…3	2…5
Скорость передачи (кбит/с)	До 50	250	100
Задержка	Секунды	Миллисекунды	Миллисекунды
Масштаб	Тысячи узлов	~65 000	~232
Топология	Звезда–звезда	Mesh	Mesh
Частота	868/915 МГц	2,4 ГГц	868/908 МГц
Доступность	Открытый	Открытый	Закрытый

Преимущества протокола [1]:

– сверхнизкое энергопотребление – Батареи служат 5 – 10 лет. Устройства могут работать годами без замены источника питания;

– дальность – до 15 км на открытой местности, 2…5 км в городской застройке;

– встроенная безопасность – двойное шифрование AES-128: сквозное (AppSKey) для данных приложения и отдельное (NwkSKey) для сетевого уровня. Стандарт изначально проектировался с учетом безопасности IoT;

– масштабируемость – один шлюз обслуживает тысячи устройств. Топология «звезда звезд» позволяет легко расширять сеть, добавляя новые шлюзы без перестройки инфраструктуры;

– открытый стандарт – LoRaWAN – открытый протокол под управлением LoRa Alliance. Огромная экосистема совместимых устройств от разных производителей без vendor lock-in;

– низкая стоимость инфраструктуры – один шлюз стоит ~7000… 25 000 руб. Использует Частотный диапазон общего пользования (нелицензируемый диапазон).

Недостатки [1]:

– низкая пропускная способность – 50 кбит/с, подходит для передачи небольших пакетов данных;

– высокая задержка – секунды, непригодно для управления устройствами в реальном времени;

– преимущественно однонаправленный трафик – большинство устройств отправляют данные (uplink). Отправка команд на устройство (downlink) ограничена и происходит только после uplink-сообщения;

– сложность развертывания частной сети – для частной сети нужен сетевой сервер. Настройка требует технической компетентности, в отличие от Wi-Fi или Zigbee.

Библиографический список

1. Bonilla, V. A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications / V. Bonilla, B. Campoverde, S. G. Yoo // Sensors. – 2023. – 23(20). – 8440.

2. LPWAN Technologies for IoT: Real-World Deployment Performance and Practical Comparison // IoT. – 2025. – 6(4). – 77.

3. LoRaWAN for Smart City IoT Deployments: A Long Term Evaluation / R. H. Cox, et al. // Sensors. – 2020. – 20(3). – 648.

СТРУКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССОМ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ БИООТХОДОВ

Д. С. Луцков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: dmitrii_luckov250898@mail.ru)

Установка гидротермальной карбонизации (ГТК) биоотходов является сложным многосвязным теплотехнологическим объектом с распределенными параметрами [1]. Классический подход к автоматизации предполагает центра-

лизованную информационно-измерительную и управляющую систему (ИИУС) с единым контроллером. Однако высокая степень взаимосвязи между элементами (тепловые и материальные потоки) и необходимость обеспечения надежности при длительной эксплуатации делают более предпочтительной построение ИИУС на основе мультиагентного подхода.

Ключевыми элементами установки ГТК биоотходов являются: бункер исходного материала; реактор; циклон; бункер биоугля [2]. Именно в них осуществляются основные стадии теплотехнологического процесса ГТК. Каждый элемент установки контролируется и управляется автономным агентом, имеющим локальные цели и собственные каналы управления и измерения, но согласующим свои действия с другими агентами через общую шину данных.

Основной функцией агента управления бункером исходного материала (АМ) является мониторинг и управление накоплением, дозированной подачей и термоподготовкой исходного сырья (управляющие параметры: частота вращения шнекового питателя; мощность электронагревателей; измеряемые параметры: температура внутри бункера; уровень или масса сырья; фактическая частота вращения шнека).

Центральным агентом системы является агент управления реактором (АР), так как именно в реакторе происходит основной теплотехнологический процесс ГТК (тепло- и массообмен в псевдоожиженном слое). Управляющие параметры АР: расход перегретого пара; мощность пароперегревателя; мощность электронагревателей реактора; скорость выгрузки биоугля; высота кипящего слоя. Измеряемые параметры АР: перепад давления на слое; температура в слое и на стенке; давление и температура пара под газораспределительной решеткой; состав неконденсируемых газов (CO, CO_2, CH_4, H_2); концентрация 5-гидроксиметилфурфурола в конденсате [1].

Агент управления циклоном (АЦ) – используется для управления процессом грубой очистки парогазового потока от уносимых мелких частиц биоугля (управляющий параметр: мощность электронагревателей; измеряемые параметры: температура; перепад давления на циклоне; масса уловленного биоугля).

Агент управления бункером готового биоугля (АБ) управляет процессом накопления и охлаждения твердого продукта карбонизации перед выгрузкой (управляющие параметры: скорость выгрузки из бункера; мощность электронагревателей; измеряемые параметры: температура; уровень/масса биоугля в бункере; масса выгруженного биоугля; температура выгружаемого продукта).

Мультиагентная структура ИИУС предполагает, что: каждый агент имеет собственный локальный контроллер; агенты обмениваются данными через промышленную сеть; глобальное управление (SCADA) выполняет функции мониторинга, архивации и задания уставок, но не вмешивается в локальные контуры при штатной работе; при отказе одного агента остальные продолжают функционировать в безопасном режиме. Такой подход к построению ИИУС обеспечивает надежность, гибкость и возможность промышленного масштабирования. В дальнейшем каждый агент может быть дополнен прогностическими моделями, что приблизит систему к полноценному цифровому двойнику процесса ГТК.

Библиографический список

1. Муратова, Н. С. Гидротермальная карбонизация биоотходов в кипящем слое в среде перегретого водяного пара: дис. … канд. техн. наук: 05.17.08 / Н. С. Муратова. – Тамбов, 2021. – 209 с.

2. Грибков, А. Н. Математическое моделирование динамических режимов теплотехнологических аппаратов / А. Н. Грибков, Д. С. Луцков, Н. Г. Буранова // Проблемы современной теплоэнергетики : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината. – Казань : ООО «Бук», 2024. – С. 151 – 157.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЕМ ЦИКЛОНА УСТАНОВКИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ БИООТХОДОВ

Д. С. Луцков, А. Н. Грибков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: dmitrii_luckov250898@mail.ru)

Современные установки гидротермальной карбонизации (ГТК) биоотходов относятся к классу энергоемких теплотехнологических объектов с высокими требованиями к точности поддержания температуры на всех этапах переработки. Поэтому весьма актуальной является задача разработки информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) такими объектами [1].

В качестве объекта исследования рассматривается установка ГТК биоотходов в кипящем слое в среде перегретого водяного пара [2]. Одним из ключевых элементов установки является циклон, выполняющий функцию сепарации твердых частиц из потока парогазовой смеси. ИИУС должна осуществлять непрерывный мониторинг технологических параметров и управление режимами работы циклона, так как конденсация влаги на его стенках приводит к нестабильности технологического процесса, смолообразованию и коррозии. Также необходимо учитывать, что управление мощностью обогрева циклона необходимо в целях энергосбережения, так как в процессе работы периодически возникают технологические паузы между загрузками сырья и постоянная работа циклона на полной мощности значительно увеличивает электропотребление.

Рассмотрим задачу создания имитационной модели для ИИУС, которая на основе ограниченных данных (геометрия, материал, начальная температура) позволяет реализовать управление режимом нагрева циклона.

Имитационная модель строится как одномерная динамическая система с сосредоточенными параметрами. Входные параметры модели [2]:

– геометрия циклона (диаметр D = 0,2 м; высота H = 0,6 м, толщина стенки δ = 0,003 м);

– материал – сталь (плотность ρ = 7800 кг/м³; теплоемкость c = 500 Дж/(кг·К));

– начальная температура $T_{нач}$ = 120 °С;

– температура среды $T_{окр}$ = 20 °С;

– коэффициент теплоотдачи h = 10 Вт/(м²·К).

Выходной параметр – температура T (°С), представляющая собой функцию времени t, описываемую моделью [3]:

$$T(t) = T_{окр} + (T_{нач} - T_{окр})e^{-t/\tau},\ \tau = \frac{ms}{hS}, \quad (1)$$

где m = 9,55 кг, S = 0,408 м², τ = 19,5 мин.

В составе ИИУС имитационная модель (1) выполняет роль вычислительного блока прогнозирования температуры в циклоне.

Разница между рассмотренной моделью и моделью с учетом излучения составила 5,4 °С, что дает систематическую ошибку ~8…10% по температуре, но не нарушает работоспособность модели при установке порогов с запасом.

Алгоритм управления нагревателем циклона:

1. На начальном этапе циклон нагревается до 120 °С с использованием алгоритма энергосберегающего управления (ЭУ).

2. При переходе в режим паузы (при отсутствии потока газа) нагреватель циклона отключается.

3. Время следующего включения нагревателя циклона (при загрузке и обработке следующей порции сырья) рассчитывается с использованием имитационной модели с учетом гарантированного вывода циклона на заданный режим с температурой не ниже порога конденсации (95 °С).

Рассмотренная имитационная модель и алгоритм управления имеют невысокую вычислительную сложность, легко интегрируются в состав алгоритмического обеспечения ИИУС и позволяют обеспечить экономию электроэнергии до 30…40% при паузах между циклами ГТК более 15 мин.

Библиографический список

1. Грибков, А. Н. Информационно-управляющие системы многомерными технологическими объектами: теория и практика : монография / А. Н. Грибков, Д. Ю. Муромцев. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 164 с.

2. Муратова, Н. С. Гидротермальная карбонизация биоотходов в кипящем слое в среде перегретого водяного пара: дис. … канд. техн. наук: 05.17.08 / Н. С. Муратова. – Тамбов, 2021. – 209 с.

3. Лыков, А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЬЕТНАМА

В. К. Нго, В. Ф. Нгуен, Т. Ю. Дорохова

Военно-Промышленный Колледж, Вьетнам,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Введение. Электроэнергетическая система играет важнейшую роль в социально-экономическом развитии любой страны. В последние годы во Вьетнаме наблюдается значительный рост потребления электроэнергии, обусловленный быстрым развитием экономики и процессами индустриализации.

По данным Министерства промышленности и торговли Вьетнама, установленная мощность электроэнергетической системы страны достигла примерно 80 ГВт в 2023 году, что делает энергосистему Вьетнама одной из крупнейших в регионе Юго-Восточной Азии [1].

Согласно Национальному плану развития электроэнергетики, установленная мощность энергосистемы Вьетнама к 2030 году может достичь 183…236 ГВт для обеспечения растущего спроса на электроэнергию [2].

Альтернативная энергетика, такая как ветровая и солнечная усложняют процессы управления энергосистемой из-за их высокой вариабельности. В связи с этим технологии искусственного интеллекта рассматриваются как инструмент повышения эффективности управления электроэнергетической системой [3].

Реализация искусственного интеллекта в электроэнергетике. Искусственный интеллект позволяет осуществлять разработку интеллектуальных систем, способных обучаться на основе данных, анализировать информацию и принимать управленческие решения. В энергетической отрасли технологии ИИ применяются для решения задач прогнозирования электрической нагрузки, прогнозирования генерации возобновляемых источников энергии, оптимизации режимов работы электрических сетей, диагностики и обнаружения аварий.

Наиболее распространенными алгоритмами являются Artificial Neural Network (ANN), Machine Learning, Deep Learning и Support Vector Machine (SVM). Эти методы позволяют эффективно обрабатывать большие массивы данных, поступающих из систем SCADA, интеллектуальных счетчиков и различных датчиков энергосистемы. Современные исследования показывают, что применение методов искусственного интеллекта значительно повышает устойчивость и эффективность функционирования электроэнергетических систем [4].

Современное состояние электроэнергетической системы Вьетнама. Электроэнергетическая система Вьетнама значительно развилась за последние годы.

1. Установленная мощность энергосистемы Вьетнама (2015 – 2030) [2]

Год	Мощность (ГВт)
2015	38
2020	69
2023	80
2030 (прогноз)	183…236

2. Структура источников электроэнергии во Вьетнаме [5]

Тип генерации	Доля (%)
Угольные электростанции	31
Гидроэнергетика	29
Солнечная энергетика	18
Ветроэнергетика	7
Газовая генерация	15

ИИ в электроэнергетической системе также применяется для прогнозирования электрической нагрузки, являющейся одной из ключевых задач управления энергосистемой. Общая модель прогнозирования нагрузки может быть представлена следующим образом:

$$P(t) = f\,(T(t), H(t), D(t), E(t)),$$

где $P(t)$ – электрическая нагрузка в момент времени t; $T(t)$ – температура окружающей среды; $H(t)$ – влажность воздуха; $D(t)$ – временные параметры; $E(t)$ – экономические факторы.

Использование алгоритмов машинного обучения позволяет выявлять сложные нелинейные зависимости между переменными и значительно повышать точность прогнозирования.

Международный опыт применения ИИ в электроэнергетике представлен в табл. 3.

3. Сравнение применения ИИ в электроэнергетике различных стран [6 – 8]

Страна	Область применения AI	Используемые технологии	Результаты
США	Прогнозирование нагрузки и управление энергосистемой	Machine Learning, Deep Learning	Точность прогнозирования до 95…97%
Германия	Интеграция ветровой и солнечной энергии	Neural Networks	Повышение устойчивости энергосистемы
Китай	Мониторинг оборудования энергосистемы	Computer Vision	Раннее выявление неисправностей
Япония	Управление энергопотреблением	Smart Grid AI	Снижение пиковых нагрузок
Вьетнам	Мониторинг линий электропередачи	Machine Learning, Computer Vision	Снижение эксплуатационных затрат

Библиографический список

1. Энергетический отчет Вьетнама за 2023 год. Министерство промышленности и торговли Вьетнама. – Ханой, 2023.
2. VIII Национальный план развития энергетики (ППР VIII). Правительство Вьетнама. – Ханой, 2023.
3. Энергетика и ИИ. Международное энергетическое агентство (МЭА). – Париж : МЭА, 2024.
4. Комплексный обзор ИИ в обеспечении стабильности энергосистемы / под ред. А. Шарма, Р. Кумар, П. Сингх // Прикладные науки. – 2024.
5. Годовой отчет за 2023 год. Энергетическая компания Вьетнама (EVN). – Ханой, 2024.
6. Искусственный интеллект и большие данные в энергетике. Международное энергетическое агентство (МЭА). – Париж : МЭА, 2017.
7. Цифровизация и энергетика. Международное энергетическое агентство (МЭА). – Париж : МЭА, 2017.
8. Применение искусственного интеллекта в интеллектуальных сетях / под ред. Ю. Чжан, Ц. Ван // Труды IEEE по энергетическим системам. – 2019.
9. Искусственный интеллект и энергосеть / под ред. Д. Цю, К. Сунь, Х. Ли // Журнал IEEE Power & Energy. – 2024.

ЗАМЕНА ИСКОПАЕМОГО ТОПЛИВА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

В. Ф. Нгуен, В. К. Нго, В. Л. Нгуен

Военно-Промышленный Колледж, Вьетнам

Энергия является фундаментальной основой социально-экономического развития. Развитие промышленности, транспорта, сельского хозяйства и сферы услуг напрямую зависит от стабильного и доступного энергоснабжения. На протяжении более чем ста лет основную роль в мировой энергетике играли ископаемые виды топлива – уголь, нефть и природный газ. Однако чрезмерная зависимость от этих ресурсов приводит к серьезным экологическим и экономическим проблемам, включая истощение природных ресурсов, рост выбросов парниковых газов и повышение рисков энергетической безопасности.

По данным Международного энергетического агентства, ископаемое топливо остается основным источником энергии в мире и обеспечивает более 80% мирового энергопотребления [1]. При этом энергетический сектор является крупнейшим источником выбросов углекислого газа. Во Вьетнаме ископаемая энергетика, особенно угольная, по-прежнему занимает значительную долю в структуре производства электроэнергии. Согласно данным Vietnam Electricity, установленная мощность угольных электростанций составляет 26 757 МВт, что соответствует примерно 33,2% общей установленной мощности энергосистемы страны, а годовая выработка электроэнергии достигает около 129 577 ГВт·ч [2].

В последние годы доля электроэнергии, производимой из низкоуглеродных источников, постепенно увеличивается. По оценкам аналитических центров, в 2024–2025 гг. около 46…47% электроэнергии во Вьетнаме обеспечивается возобновляемыми и другими низкоуглеродными источниками энергии [3]. В этих условиях переход к возобновляемой энергетике становится стратегическим направлением энергетической политики многих стран мира.

Ископаемые источники энергии представляют собой невозобновляемые ресурсы, сформировавшиеся в течение миллионов лет из органических остатков растений и животных. К ним относятся уголь, нефть и природный газ. Возобновляемые источники энергии, напротив, представляют собой природные энергетические ресурсы, способные воспроизводиться в относительно короткие временные периоды. К основным видам возобновляемой энергетики относятся солнечная энергия, энергия ветра, гидроэнергия, биомасса, геотермальная энергия.

Современные исследования показывают, что возобновляемая энергетика становится главным источником роста мировых энергетических мощностей. Согласно отчету Международного энергетического агентства, около 38% прироста мирового энергоснабжения обеспечивается за счет возобновляемых источников энергии. Одновременно значительно снижается стоимость производства электроэнергии из таких источников. По данным Международного агентства по возобновляемой энергетике, около 91% новых проектов возобновляемой энергетики, введенных в эксплуатацию в 2024 г., оказались дешевле аналогичных электростанций на ископаемом топливе.

Во Вьетнаме также наблюдается активное развитие возобновляемой энергетики. В соответствии с национальной энергетической стратегией к 2030 г. доля возобновляемых источников энергии (без крупных гидроэлектростанций) должна достигнуть примерно 21% установленной мощности энергосистемы [4].

Несмотря на активное развитие возобновляемых источников энергии, мировая энергетическая система по-прежнему во многом зависит от ископаемого топлива. Согласно аналитическим данным, доля ископаемых ресурсов в мировом энергобалансе превышает 80%, что приводит к значительным выбросам углекислого газа и усилению глобальных климатических изменений.

Во Вьетнаме в 2023 г. общий объем производства электроэнергии составил 280 629 ГВт·ч, из которых около 129 577 ГВт·ч было произведено на угольных электростанциях. По оценкам экспертов, в 2025 г. ископаемые источники энергии (уголь и природный газ) обеспечивают около 54% производства электроэнергии, тогда как доля возобновляемых источников составляет около 46% [3]. Быстрый рост солнечной и ветровой энергетики сопровождается рядом технических проблем, связанных с ограниченной пропускной способностью электрических сетей и необходимостью модернизации инфраструктуры.

Использование ископаемых источников энергии сопровождается рядом негативных последствий, включая истощение природных ресурсов, загрязнение окружающей среды, увеличение выбросов парниковых газов и рост рисков энергетической зависимости. Кроме того, загрязнение воздуха оказывает серь-

езное воздействие на здоровье населения и приводит к значительным социально-экономическим издержкам.

Вьетнам обладает значительным потенциалом для развития возобновляемых источников энергии. Средний уровень солнечной радиации составляет около 4…5 кВт·ч/м² в сутки, что создает благоприятные условия для развития солнечной энергетики. Потенциал офшорной ветроэнергетики оценивается примерно в 470 ГВт, что является одним из самых высоких показателей в Азии. Кроме того, страна располагает значительными ресурсами биомассы и малой гидроэнергетики.

Развитие возобновляемой энергетики имеет ряд важных преимуществ, включая снижение выбросов парниковых газов, повышение энергетической независимости, создание новых рабочих мест и развитие инновационных технологий. По данным международных исследований, в 2024 г. стоимость электроэнергии из возобновляемых источников была на 40…50% ниже по сравнению с традиционными источниками энергии. Согласно отчету Global Electricity Insights, в первой половине 2025 г. производство электроэнергии из ветровых и солнечных электростанций впервые превысило производство электроэнергии на угольных электростанциях, что свидетельствует о начале структурных изменений в мировой энергетике.

Несмотря на значительные достижения, развитие возобновляемой энергетики сталкивается с рядом серьезных проблем. К ним относятся необходимость модернизации электрических сетей, высокая стоимость первоначальных инвестиций, недостаточная развитость систем накопления энергии, дефицит квалифицированных специалистов и зависимость от международных цепочек поставок оборудования. Для преодоления этих проблем требуется комплексная государственная политика, долгосрочная стратегия энергетического развития и активное международное сотрудничество.

Перспективными направлениями развития являются внедрение современных технологических решений, включая развитие систем накопления энергии, использование водородных технологий, цифровизацию энергосистем и применение технологий искусственного интеллекта для прогнозирования нагрузки и управления энергетическими сетями. Важную роль играют экономические меры, такие как создание прозрачных механизмов финансирования проектов возобновляемой энергетики, внедрение «зеленых» финансовых инструментов и постепенное сокращение использования угольной энергетики.

Не менее важным является развитие образовательных программ в области возобновляемой энергетики, подготовка квалифицированных специалистов и повышение общественной осведомленности о преимуществах чистой энергии.

Современная мировая энергетическая система находится в стадии глубокой трансформации. Ископаемое топливо, несмотря на свою историческую роль, постепенно утрачивает доминирующее положение из-за экологических и экономических ограничений. Возобновляемая энергетика становится ключевым фактором устойчивого развития, поскольку развитие солнечной, ветровой и других видов чистой энергии позволяет значительно сократить выбросы парниковых газов и повысить энергетическую безопасность государств. Для

Вьетнама переход к возобновляемой энергетике представляет собой стратегическую задачу, направленную на обеспечение долгосрочного экономического роста, энергетической независимости и экологической устойчивости.

Библиографический список

1. Возобновляемая энергия против ископаемого топлива: финансовый аспект // EnergyTracker Asia. – 2025.
2. Обзор национальных источников энергии в 2023 году. Энергетическая компания Вьетнама (EVN). – Ханой : EVN, 2023.
3. Низкоуглеродная энергетика. Структура производства электроэнергии во Вьетнаме в 2024/2025 годах. – LowCarbonPower.org, 2025.
4. Глобальный обзор энергетики 2025. Международное энергетическое агентство (МЭА). – Париж : МЭА, 2025.

СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Е. М. Николюкина

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: nikolykina@mail.ru)

Задача формирования оптимальной программы энергосбережения применительно к конкретному объекту является весьма сложной и трудоемкой, так как для ее решения необходимо не только провести сбор и анализ большого объема исходных данных, но и учесть множество значений нормативных параметров, ограничений финансовых и материальных ресурсов, произвести расчет и анализ эффективности энергосберегающих мероприятий, учесть их взаимное влияние и т.д. Повысить эффективность процесса формирования программы энергосбережения возможно за счет разработки информационной системы, обеспечивающей поддержку принятия решений с учетом особенностей потребителя топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [1].

На рисунке 1 представлена структура информационной системы поддержки принятия решений по формированию оптимальной программы энергосбережения.

В структуре информационной системы целесообразно выделить следующие функциональные компоненты:

1. Подсистема пользовательского интерфейса, при помощи которой «Лицо, принимающее решение» (ЛПР) вносит исходные данные и получает результаты; «Эксперт» может вносить изменения в базу данных и базу знаний, например, если изменились значения нормативных показателей.

2. Модуль формирования отчетов обеспечивает подготовку отчетной документации по программе энергосбережения.



Рис. 1. Структура информационной системы поддержки принятия решений

3. Модуль анализа мероприятий позволяет производить расчет и анализ эффективности энергосберегающих мероприятий.

4. База данных обеспечивает хранение исходных данных, в том числе нормативных значений показателей, установленных для потребителей ТЭР, а также результаты работы модулей системы.

5. База знаний включает продукционные правила, которые позволяют произвести оценку показателей экономической, технической и экологической эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом специфики конкретного объекта (потребителя ТЭР).

6. Модуль нечеткого вывода обеспечивает преобразование значений лингвистических переменных в количественные оценки.

7. Модуль синтеза решений позволяет сформировать множество наиболее эффективных мероприятий для включения в программу энергосбережения с учетом имеющихся ограничений.

Практическое применение информационной системы позволит снизить трудоемкость и временные затраты за счет перехода от ручного к автоматизированному формированию оптимальных программ энергосбережения, обеспечивая высокую достоверность результатов и эффективность использования финансовых и материальных ресурсов.

Библиографический список

1. Николюкина, Е. М. Концепция применения цифровых интеллектуальных технологий в задачах разработки и реализации энергосберегающих мероприятий / Е. М. Николюкин, А. Н. Грибков // Цифровая трансформация в энергетике. Вып. VII : сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. для студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026. – С. 99 – 103.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ БЕСКОНТАКТНОГО АДАПТИВНОГО МИКРОВОЛНОВОГО МЕТОДА И ВЫДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ В СОСТАВЕ ПОЛНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Д. Ю. Остроухов, В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Denistambov359@gmail.com)

Разработан эффективный метод измерения теплофизических свойств (ТФС) строительных материалов и изделий, в котором температуро- и теплопроводность определяются следующими соотношениями [1]:

$$a = \frac{V_1(R_{\text{изм1}} - x_{\text{изм2}})}{2\ln\left(\frac{T_{\text{изм1}}x_{\text{изм1}}}{T_{\text{изм2}}R_{\text{изм1}}}\right)}; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{q}{2\pi\Delta T}\left(\frac{1}{R_{\text{изм2}}}\exp\left[\frac{V_2(R_{\text{изм2}} - x_{\text{изм3}})}{2a}\right] - \frac{1}{R_{\text{изм1}}}\exp\left[\frac{V_1(R_{\text{изм1}} - x_{\text{изм2}})}{2a}\right]\right). \quad (2)$$

Анализ погрешностей, их характеристик прямых и косвенных измерений заключается в разложении полной погрешности на компоненты и выявлении доминирующих компонент полной погрешности на аналитической основе методом поиска частных производных каждого компонента [2].

В соответствии с выражением (1) полная погрешность определения температуропроводности Δa зависит от точности установления V, R_x, x_1, x_2.

Следовательно, полная погрешность определения теплопроводности составляет:

$$\Delta a = \Delta_{V1}a + \Delta_{R\text{изм1}}a + \Delta_{x\text{изм1}}a + \Delta_{x\text{изм2}}a + \Delta_{T\text{изм1}}a + \Delta_{T\text{изм2}}a, \quad (3)$$

где погрешность, обусловленная отличием V_1 от истинного значения V_1, равна

$$\Delta_{V1}a = \frac{R_{\text{изм1}} - x_{\text{изм2}}}{2\ln\left(\frac{T_{\text{изм1}}x_{\text{изм1}}}{T_{\text{изм2}}R_{\text{изм1}}}\right)}, \quad (4)$$

погрешность, обусловленная отличием $R_{\text{изм1}}$ от истинного значения $R_{\text{изм1}}$, равна

$$\Delta_{R\text{изм1}}a = \frac{\frac{2V_1(R_{\text{изм1}} - x_{\text{изм2}})}{R_{\text{изм1}}} - 2\ln\left(\frac{T_{\text{изм1}}x_{\text{изм1}}}{T_{\text{изм2}}R_{\text{изм1}}}\right)}{4\ln^2\left(\frac{T_{\text{изм1}}x_{\text{изм1}}}{T_{\text{изм2}}R_{\text{изм1}}}\right)}, \quad (5)$$

погрешность, обусловленная отличием $x_{\text{изм1}}$ от истинного значения $x_{\text{изм1}}$, равна

$$\Delta_{x\text{изм}1}a = \frac{2V_1 \dfrac{(R_{\text{изм}1} - x_{\text{изм}2})}{x_{\text{изм}1}}}{4\ln^2\left(\dfrac{T_{\text{изм}1}x_{\text{изм}1}}{T_{\text{изм}2}R_{\text{изм}1}}\right)}, \quad (6)$$

погрешность, обусловленная отличием $x_{\text{изм}2}$ от истинного значения $x_{\text{изм}2}$, равна

$$\Delta_{x\text{изм}2}a = \frac{V_1}{2\ln\left(\dfrac{T_{\text{изм}1}x_{\text{изм}1}}{T_{\text{изм}2}R_{\text{изм}1}}\right)}. \quad (7)$$

В соответствии с выражением (2) полная погрешность определения теплопроводности $\Delta\lambda$ зависит от точности установления V, R_x, x_1, x_2, q и точности измерения $T_{\text{зад}1}$ и a. Следовательно, полная погрешность определения теплопроводности рассчитывается как:

$$\Delta\lambda = \Delta_{V1}\lambda + \Delta_{V2}\lambda + \Delta_{R\text{изм}1} + \lambda\Delta_{R\text{изм}2}\lambda + \Delta_{x\text{изм}2}\lambda + \Delta_{x\text{изм}3}\lambda + \Delta_T\lambda + \Delta_q\lambda + \Delta_a\lambda, \quad (8)$$

где погрешность, обусловленная отличием q от истинного значения q, равна

$$\Delta_q\lambda = \frac{1}{2\pi\Delta T}\left(\frac{1}{R_{\text{изм}2}}\exp\left(\frac{V_2(R_{\text{изм}2} - x_{\text{изм}3})}{2a}\right) - \frac{1}{R_{\text{изм}1}}\exp\left(\frac{V_1(R_{\text{изм}3} - x_{\text{изм}2})}{2a}\right)\right), \quad (9)$$

погрешность, обусловленная отличием ΔT от истинного значения ΔT, равна

$$\Delta_{\Delta T}\lambda = -\frac{q}{2\pi\Delta T}\left(\frac{1}{R_{\text{изм}2}}\exp\left(\frac{V_2(R_{\text{изм}2} - x_{\text{изм}3})}{2a}\right) - \frac{1}{R_{\text{изм}1}}\exp\left(\frac{V_1(R_{\text{изм}3} - x_{\text{изм}2})}{2a}\right)\right), \quad (10)$$

погрешность, обусловленная отличием $x_{\text{изм}3}$ от истинного значения $x_{\text{изм}3}$, равна

$$\Delta_{x\text{изм}3}\lambda = -\frac{q}{2\pi\Delta T^2}\left(\frac{1}{R_{\text{изм}2}}\exp\left(\frac{V_2(R_{\text{изм}2} - x_{\text{изм}3})}{2a}\right)\frac{V_2}{2a}\right), \quad (11)$$

погрешность, обусловленная отличием V_2 от истинного значения V_2, равна

$$\Delta_{V2}\lambda = \frac{q}{2\pi\Delta T}\left(\frac{1}{R_{\text{изм}2}}\exp\left(\frac{V_2(R_{\text{изм}2} - x_{\text{изм}3})}{2a}\right)\left(\frac{(R_{\text{изм}2} - x_{\text{изм}3})}{2a}\right)\right), \quad (12)$$

погрешность, обусловленная отличием a от истинного значения a, равна

$$\Delta_a\lambda = -\frac{q}{2\pi\Delta T}\left(\frac{1}{R_{\text{изм}2}}\exp\left(\frac{V_2(R_{\text{изм}2} - x_{\text{изм}3})}{2a}\right)\left(\frac{V_2(R_{\text{изм}2} - x_{\text{изм}3})}{2a^2}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{1}{R_{\text{изм}1}}\exp\left(\frac{V_1(R_{\text{изм}3} - x_{\text{изм}2})}{2a}\right)\left(\frac{V_1(R_{\text{изм}3} - x_{\text{изм}2})}{2a^2}\right)\right). \quad (13)$$

Соотношения (3) – (7) и (8) – (13) позволяют выделить доминирующие компоненты полных погрешностей температуропроводности Δa и теплопроводности $\Delta\lambda$. Результаты выделения доминант представлены в табл. 1. Отклонения каждого параметра составляют ±10% при постоянстве остальных.

1. Результаты выделения доминирующих составляющих

Параметр		q	V_1	V_2	$X_{изм1}$	$X_{изм2}$	$X_{изм3}$	$R_{изм1}$	$R_{изм2}$	$T_{изм1}$	$T_{изм2}$	ΔT	a
Максимальное отклонение, %	a	–	21,3	–	56,4	31,1	–	–	–	43,3	53,4	–	–
	λ	23,4	63,9	47,9	–	25,5	15,3	55,1	57,5	–	–	2,7	67,9

Анализ полученных данных показал, что доминантами полной погрешности определения температуропроводности являются параметры $x_{изм1}$ $T_{изм1}$ и $T_{зим2}$, а для теплопроводности являются V_1, V_2, $R_{изм2}$, a. Информация о вкладе компонент в общую погрешность измерений искомых ТФХ позволяет принять меры по их минимизации.

Библиографический список

1. Остроухов, Д. Ю. Микроволновый метод и реализующая его система неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий / Д. Ю. Остроухов, Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.

2. Чернышов, В. Н. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова. – СПб. : Экспертные решения, 2016. – 384 с.

МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОГРАНИЗАЦИИ РОЕВОЙ (ГРУППОВОЙ) ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БПЛА)

А. А. Подать, И. А. Попов, П. П. Фролов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: feelsbadmanpepe@mail.ru)

Современные технологии в области беспилотных летательных аппаратов стали неотъемлемым инструментом в различных отраслях промышленности, строительства, сельского хозяйства и в том числе геодезии. Одной из основных задач применения БПЛА в геодезии и картографировании, является обеспечение эффективной организации роевой геодезической съемки для сбора и обработки пространственных данных. Их применение позволяет решать широкий спектр задач, от классической топографической съемки до специализированных инженерных задач. В контексте роевой съемки, когда несколько БПЛА одновременно собирают данные на большой территории, применение СНС позволяет обеспечить высокую точность классификации объектов местности [1]. Однако эффективность применения СНС напрямую зависит от выбора методов обучения, адаптированных к специфике работы БПЛА [4].

Метод обратного распространения ошибки (Backpropagation) является фундаментальным для обучения сверточных нейронных сетей и заключается в нахождении градиента функции потерь относительно весов сети, что позволяет затем корректировать веса с помощью градиентного спуска. Применительно к задачам роевой геодезической съемки, позволяет слоям вносить корректировки для улучшения точности распознавания геологических объектов [3].

Метод федеративного обучения (Federated Learning) представляет собой распределенный подход, при котором модель выполняет локальное обучение на децентрализованных данных, не собирая их в едином месте, а затем передает на центральный сервер только обновления весов (градиенты), а не сами данные. В контексте роевой геодезической съемки обладает рядом существенных преимуществ [4]:

– снижается нагрузка на каналы связи между дронами и наземной станицей, так как передаются лишь компактные обновления весов;

– сохраняется работоспособность системы даже при временном отсутствии связи у отдельных единиц роя.

Метод совместного восприятия (Cooperative Perception) – метод, при котором автономные единицы не только обрабатывают данные собственных сенсоров, но и обмениваются данными с другими единицами в группе через нейронные сети для создания общей, расширенной картины окружения, что позволяет преодолеть ограничения «слепых зон» каждой автономной единицы по отдельности, значительно повышая безопасность и эффективность сбора геоданных [2].

Таким образом, применение СНС для организации роевой геодезической съемки позволяет эффективно обрабатывать большие объемы пространственных данных, автоматически классифицировать объекты местности и строить точные 3D-модели. Это может являть полезным для разного рода геодезических задач, таких как геологоразведочное картирование, топографическое картографирование крупных территорий, мониторинг земельных участков и др. Методы обучения сверточных нейронных сетей для организации роевой (групповой) геодезической съемки на базе беспилотных летательных аппаратов являются важной задачей исследования в области геодезии. СНС позволяют обрабатывать большой объем пространственных данных, поступающих от большой группы БПЛА, и выявлять особенности рельефа и объектов местности, что обеспечивает высокую точность и оперативность геодезических и картографических работ.

Библиографический список

1. Николенко, С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. – Питер, 2018. – 479 с.

2. Кобелев, В. А. Сравнительный анализ методов сопоставления изображений для навигации беспилотных летательных аппаратов без глобальных навигационных спутниковых систем / В. А. Кобелев // Молодой ученый. – 2026. – № 14(617). – С. 28 – 31.

3. Rumelhart, D. E. Learning representations by back-propagating errors / D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams // Nature. – 1986. – V. 323. – P. 533 – 536.

4. Анализ современных методов распознавания малоразмерных воздушных объектов на основе машинного обучения / Е. Н. Гарин, А. Б. Гладышев, Н. В. Копылов и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2026. – Т. 19, № 1.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (ИИ) В БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ (БПЛА) ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ РОЕВОЙ (ГРУППОВОЙ) ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ.

А. А. Подать, И. А. Попов, П. П. Фролов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: feelsbadmanpepe@mail.ru)

В настоящее время развитие беспилотных летательных аппаратов открыло новые возможности для геодезической съемки и картографирования. Однако использование одного дрона имеет критичные ограничения: время полета ограничено емкостью аккумулятора и энергоэффективностью системы, а зона покрытия за один вылет не может превышать определенных размеров.

Роевая (групповая) съемка – одновременное использование нескольких БПЛА – позволяет сильно ускорить процесс сбора геопространственных данных, но требует серьезной интеллектуальной координации, действий множества систем и соответствующее количество операторов, что существенно увеличивает затраты. Оператор может управлять одним, максимум двумя беспилотниками, а роем уже ни один оператор не сможет управлять [2].

Чтобы решить данную задачу, необходимо использовать более оптимальные и эффективные методы. Одним из таких является применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) для автономной координации групп БПЛА при выполнении геодезических задач, что позволит существенно повысить эффективность геодезических работ [1].

Одной из актуальных задач применения ИИ в роевой геодезической съемке является обеспечение автономной навигации в условиях, когда спутниковая навигация GPS/ГЛОНАСС недоступна или работает с помехами. БПЛА могут использовать машинное зрение для навигации, анализируя цифровые карты местности и определяя координаты без GPS-сигнала [3].

Современные разработки в этой области включают нейросетевые модели геофизических полей Земли для навигации и синтетические алгоритмы комплексирования информации от разных систем измерения. Это позволяет «рою» дронов сохранять работоспособность в сложных условиях – в глубоких каньонах, густых лесах [2] или при радиоэлектронном подавлении сигналов, а также

получать преимущества перед одиночными БПЛА в виде высокой скорости и охвата больших площадей.

Ключевые особенности сочетания технологий искусственного интеллекта в роевой геодезии:

– Распределенная координация и автономность: БПЛА взаимодействуют друг с другом, что позволяет автономно распределять задачи по съемке, планировать траектории и избегать столкновений без постоянной связи с оператором;

– Бортовая обработка данных: нейросети обрабатывают геоданные прямо на борту. Это снижает необходимость передачи больших данных на землю и ускоряет создание карт [4].

– Автономная фотограмметрия и LiDAR: способность синхронизировать работу камер и лидаров для получения точных 3D-облаков точек.

Таким образом, применение искусственного интеллекта в роевой геодезической съемке представляет собой эффективное решение для автоматизации сбора и обработки пространственных данных, унификацию и оптимизацию комплексной системы. Интеграция нейросетевой обработки аэроснимков и роевого интеллекта позволяет существенно сократить сроки и стоимость работ, повысить точность позиционирования и обеспечить возможность обследования труднодоступных территорий и исключить влияние человеческого фактора.

Библиографический список

1. Амосов, О. С. Интеллектуальные технологии совместной навигации и функционирования подвижных объектов в разных физических средах / О. С. Амосов, С. Г. Амосова // Информационные технологии. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 24 – 34.

2. Доверительно-взвешенное кооперативное слияние наблюдений для безопасной навигации роев БПЛА / Е. А. Конников, Г. И. Голиков, П. А. Поляков и др. // Программные системы и вычислительные методы. – 2026. – № 1. – С. 1 – 15.

3. Рулько, Е. В. Навигация по снимкам местности на основе сопоставления глубоких признаков и визуальной одометрии / Е. В. Рулько // Доклады БГУИР. – 2025. – Т. 23, № 1. – С. 4 – 19.

4. Сусленко, О. Ю. Сравнение архитектур нейронных сетей для пространственной ориентации беспилотных летательных аппаратов и наземных дронов / О. Ю. Сусленко // Кибернетика и компьютерные технологии. – 2025. – № 4. – С. 99 – 105.

АРХИТЕКТУРА КОМПОНЕНТА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

К. А. Полкунов, Н. Г. Чернышов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: polkunovk@yandex.ru)

Существующие системы мониторинга зачастую реализуют лишь регистрацию параметров и пороговую сигнализацию, не обеспечивая прогнозирование остаточного ресурса (ОР) в автоматическом режиме [1]. Ранее автором обоснован гибридный подход: аналитическая оценка – базовый ориентир, нейросетевая модель – уточнение по данным мониторинга. Цель данной работы – разработка архитектуры программного компонента, реализующего этот подход.

Функциональные требования к компоненту: прием потоковых данных от датчиков; предобработка; расчет остаточного ресурса (ОР) по аналитическим моделям износа; прогнозирование ОР нейросетевой моделью; консолидация оценок и сигнализация; хранение истории; REST API для интеграции.

Нефункциональные: время отклика ≤ 5 с; обработка данных от десятков компонентов; отказоустойчивость при недоступности нейросетевого модуля; горизонтальное масштабирование; API (REST, MQTT).

Архитектура включает пять модулей, взаимодействующих через асинхронный обмен сообщениями.

Модуль сбора и предобработки. Данные поступают через MQTT (стандарт IIoT (промышленный интернет вещей)) или REST-адаптер. Конвейер: фильтрация выбросов, интерполяция пропусков, нормализация к [0, 1] по статистикам обучающей выборки, оконное агрегирование (среднее, σ – среднеквадратическое отклонение, медиана, размах). Длительность окна зависит от динамики: для коррозии – часы, для виброизноса – секунды.

1. Модули архитектуры

Модуль	Назначение	Технология
Сбора и предобработки	Прием (MQTT/REST), фильтрация, нормализация, оконное агрегирование	Eclipse Paho, Spring Integration
Аналитического расчета	Расчет ОР по четырем моделям износа (< 100 мс)	Spring Boot, Java 21
Интеллектуального прогнозирования	Прогноз LSTM-сетью, вывод через ONNX Runtime	ONNX Runtime, PyTorch (обучение)
Принятия решений	Консолидация оценок, трехуровневая сигнализация	Spring Boot, REST API
Хранения истории	Архив расчетов и данных, БД для переобучения	PostgreSQL / SQLite, JPA

Модуль аналитического расчета реализует четыре модели: линейную коррозионного износа, правила Майнера для усталости, уравнение Аррениуса для термической деградации и зависимость Арчарда для фрикционного износа.

Модуль интеллектуального прогнозирования реализует LSTM-сеть (Long Short-Term Memory) [2], получающую последовательность оконных признаков (look-back window (окно ретроспективы) – гиперпараметр) и выдающую скалярную оценку ОР. Обучение офлайн (MSE (среднеквадратичная ошибка) + L2-регуляризация), развертывание через ONNX (Open Neural Network Exchange) [3], периодическое переобучение.

Модуль принятия решений. Консолидированная оценка: при наличии обеих – взвешенное среднее с весами по ретроспективной точности; при отклонении более 50% – только аналитическая; при отсутствии аналитической – только интеллектуальная. Сигнализация: норма / предупреждение / авария – пороги задаются индивидуально для каждого компонента.

Предложена модульная архитектура компонента ИС для прогнозирования ОР, реализующая гибридный подход с трехуровневой сигнализацией и постепенной деградацией. Использование REST, MQTT и ONNX обеспечивает интегрируемость в АСУ ТП.

Библиографический список

1. Optimum. Мониторинг оборудования [Электронный ресурс] // ЦДЦ Групп. – URL : https://cdc.ru/products/optimum-equipment-monitoring/ (дата обращения: 01.05.2026).

2. LSTM – нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью [Электронный ресурс] // Neurohive. – URL : https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/lstm-nejronnaja-set/ (дата обращения: 01.05.2026).

3. ONNX Runtime [Электронный ресурс] // onnxruntime.ai. – URL : https://onnxruntime.ai/ (дата обращения: 01.05.2026).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

К. А. Полкунов, Н. Г. Чернышов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: polkunovk@yandex.ru)

Проблема оценки остаточного ресурса (ОР) центральная в теории надежности. Аналитические модели обладают ясным физическим смыслом, но ограничены при совместном действии факторов, а интеллектуальные методы требуют больших объемов данных и сложны в интерпретации. Цель статьи – сравнительный анализ обоих классов и обоснование гибридного подхода.

Модель коррозионного износа (линейная модель):

$$\text{ОР} = \frac{h_0 - \delta_{\text{доп}}}{\text{v}_{\text{корр}}},$$

где h_0 – начальная толщинаж; $\delta_{\text{доп}}$ – допустимое утонение; $\text{v}_{\text{корр}}$ – скорость коррозии.

Проста и наглядна, но справедлива лишь для равномерной коррозии и не учитывает локальные формы разрушения и изменчивость скорости во времени.

Модель усталостного разрушения (правило Пальмгрена–Майнера):

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i},$$

где D – суммарное усталостное повреждение; n_i – число циклов при i-м уровне напряжений; N_i – предельное число циклов по кривой Велера. Условие разрушения: $D \geq 1$. Модель не учитывает последовательность нагружения: фактическое D при разрушении варьируется от 0,2 до 5,0.

Модель термической деградации (уравнение Аррениуса):

$$k = A \cdot \exp \frac{-E_{\text{a}}}{RT},$$

где k – скорость реакции; A – предэкспоненциальный множитель; E_{a} – энергия активации; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Хорошо описывает термическое старение полимеров и изоляции, но не учитывает совместное влияние температуры и нагрузок и предполагает постоянство энергии активации [1].

Модель фрикционного износа (зависимость Арчарда):

$$V = K \frac{F_n L}{H},$$

где V – объемный износ; K – безразмерный коэффициент износа; F_n – нормальная нагрузка; L – путь трения; H – твердость материала. Коэффициент K варьируется на порядки в зависимости от режима трения; модель описывает лишь стадию установившегося износа [2].

Интеллектуальные методы (SVR, ансамбли деревьев, RNN, CNN, трансформеры) выявляют нелинейные связи, но требуют больших выборок и неинтерпретируемы. Аналитические модели точны при одиночных механизмах деградации, но теряют точность при совместном действии факторов.

Методы взаимодополняемы: аналитические дают физически обоснованную оценку, интеллектуальные уточняют ее по данным мониторинга. Отклонение нейросетевого прогноза от аналитического – индикатор аномалии. Реализация на Spring Boot + ONNX подтвердила работоспособность подхода.

1. Сравнение аналитических моделей

Модель	Зависимость	Преимущества	Ограничения
Коррозионного износа	$\text{ОР} = \frac{h_0 - \delta_{\text{доп}}}{v_{\text{корр}}}$	Простота, наглядность	Только равномерная коррозия
Усталостного разрушения	$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$	Нормативная база	Не учитывает последовательность нагружения
Термической деградации	$k = A \cdot \exp\frac{-E_a}{RT}$	Физическое обоснование	Постоянство E_a, нет совместного влияния
Фрикционного износа	$V = K\frac{F_n L}{H}$	Универсальность	K варьируется на порядки

Библиографический список

1. Уравнение Аррениуса // Inner.su: [сайт]. – URL : https://inner.su/services/svante-arrenius-uravnenie-energiya-aktivatsii-teoriya-formula-biografiya/ (дата обращения: 01.05.2026).

2. Клебанов, Я. М. Пошаговое моделирование износа рабочих поверхностей роликовых подшипников / Я. М. Клебанов, В. В. Мурашкин, А. М. Бражникова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 42 – 56.

НЕЙРОСЕТЬ НА КРИОГЕННЫХ ЧИПАХ

Б. А. Попов, С. С. Неверов

Многопрофильный колледж, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: boqdan2009p@gmail.com; neverovser08052009@gmail.com)

Нейросеть на криогенных чипах – это подход, при котором искусственный интеллект работает на чипах, охлажденных до сверхнизких температур (около –270 °С). Обычные процессоры сильно греются и тратят много энергии. Криогенные чипы решают эту проблему за счет эффекта сверхпроводимости: ток идет без сопротивления, тепла почти нет, а сигналы проходят мгновенно.

Вместо транзисторов используются джозефсоновские переходы – элементы из сверхпроводников. Они переключаются под действием магнитного поля, потребляя в тысячи раз меньше энергии. Нейросеть на таких элементах может работать на очень высоких частотах без перегрева.

Криогенный нейрочип – специализированный процессор, предназначенный для обучения и работы нейросетей.

1. Сравнение с обычным процессором

Параметр	Обычный процессор	Криогенный нейрочип
Температура работы	~50 °C	–270 °C
Энергопотребление	от 35 до 125 Вт	10 мкВт
Тактовая частота	до 3…4 ГГц	80 ГГц

Пока что существует в виде лабораторного прототипа, его создание говорит о практических шагах России в области создания энергоэффективной электроники для искусственного интеллекта нового поколения.

Тестовый запуск запланирован на 2027 год.

Также в 2025 году зарубежные исследователи запустили нейросеть на сверхпроводящих элементах, которая распознавала цифры с точностью более 98% и тратила в 15 000 раз меньше энергии, чем GPU.

Проблемы технологии:

- Сложное и дорогое охлаждение (нужен криостат).
- Трудно подключать к обычным компьютерам без потери эффективности.
- Пока нет серийного производства.

Нейросети на криогенных чипах – перспективное направление для искусственного интеллекта. Технология позволяет резко снизить энергопотребление и ускорить вычисления. Несмотря на сложности, первые прототипы уже доказывают ее работоспособность. В ближайшие годы возможно появление промышленных образцов.

Библиографический список

1. Куприянов, М. Ю. Джозефсоновские переходы в нейроморфных вычислителях / М. Ю. Куприянов, А. В. Ломакин // Радиотехника и электроника. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 312 – 320.

2. Нетрадиционные методы вычислений и будущие вызовы для сверхпроводящих цифровых вычислителей / Г. Микелогяннакис, А. Бутко, П. Гонсалес-Герреро и др. // Frontiers in Materials. – 2025. – Т. 12. – Ст. 1618615.

3. Сидорова, А. Н. Криогенные технологии в искусственном интеллекте / А. Н. Сидорова // Молодой ученый. – 2026. – № 3. – С. 45 – 49.

4. Шмидт, В. В. Введение в физику сверхпроводников / В. В. Шмидт. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : МЦНМО, 2000.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ПО ТРЕНДАМ ВИБРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДШИПНИКОВ

И. А. Попов, А. А. Подать, П. П. Фролов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tstu@tstu.ru)

В работе представлен алгоритм прогнозирования остаточного ресурса центробежного насоса, являющийся составной частью разработанной системы мониторинга состояния промышленных объектов. Переход от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию требует количественной оценки времени, остающегося до достижения оборудованием критического состояния. Среди множества диагностических параметров наиболее информативными для прогнозирования деградации насоса являются вибрация корпуса и температура подшипников, так как они интегрально отражают развитие таких дефектов, как дисбаланс ротора, износ подшипников и кавитация. Предложенный алгоритм основан на построении линейной регрессионной модели для каждого из двух параметров по накопленным историческим данным. В каждый момент времени методом наименьших квадратов оцениваются параметры тренда: скорость деградации (коэффициент наклона) и начальное значение. Затем из условия достижения параметром аварийного порога рассчитывается остаточный ресурс. Для вибрации порог установлен равным 4,5 мм/с, для температуры подшипников – 80 °С. Модель использует скользящее окно глубиной до 20 последних измерений, что позволяет адаптироваться к изменению скорости деградации во времени. Реализация алгоритма выполнена на языке Python с использованием библиотек NumPy, scikit-learn и Matplotlib. В ходе имитационного моделирования на временном интервале 200 часов с шагом 5 ч генерировались данные с линейным ростом параметров и наложенным гауссовым шумом. Результаты показали, что при текущей вибрации 4,23 мм/с и выявленном тренде 0,0147 мм/с в час прогнозируемый остаточный ресурс составил 18,7 ч; при температуре подшипников 75,7 °С и тренде 0,11 °С в час – 38,8 ч. Построенные графики динамики параметров и их линейной экстраполяции наглядно демонстрируют момент пересечения аварийных порогов (рис. 1).

Основными преимуществами предложенного подхода являются вычислительная простота, устойчивость к кратковременным выбросам за счет регрессии по нескольким точкам, а также возможность комбинирования двух параметров для повышения достоверности прогноза: если один из датчиков выходит из строя или дает аномальные показания, система продолжает работу по другому параметру. В перспективе предполагается замена линейной регрессии на адаптивные модели (экспоненциальное сглаживание, рекуррентные нейронные сети) для учета нелинейной деградации, характерной для поздних стадий износа подшипников. Разработанный алгоритм планируется интегрировать

в общую систему мониторинга на базе отечественного контроллера ОВЕН СПК110, что позволит оператору своевременно планировать ремонтные работы, избегая внезапных отказов насосного оборудования.

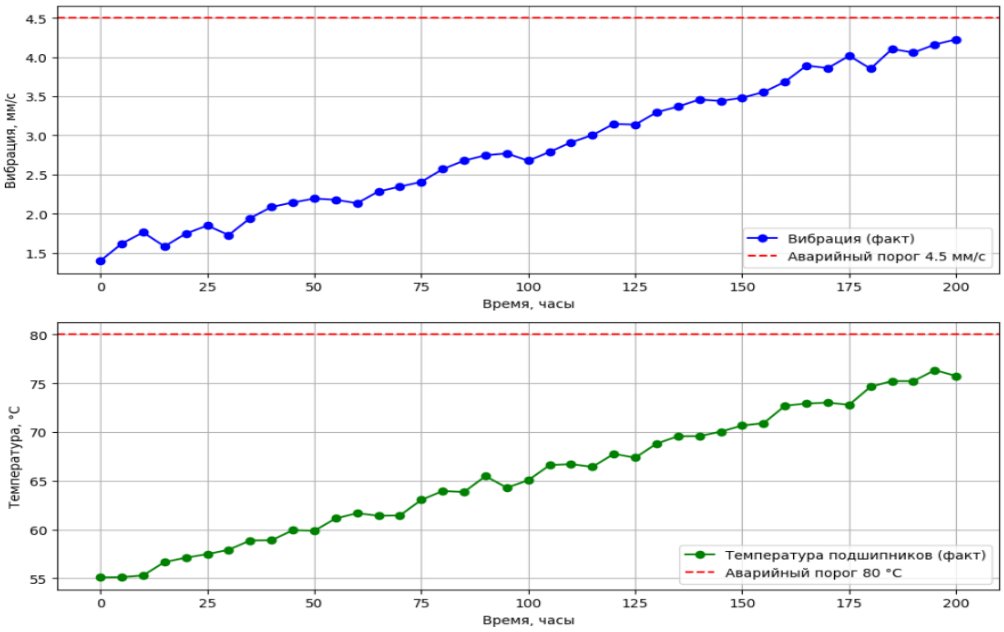


Рис. 1. Динамика диагностических параметров центробежного насоса

Библиографический список

1. Контроль состояния энергоемких объектов по данным телеметрической информации / Н. Г. Чернышов, Р. В. Цыганков, К. В. Чикаев, А. А. Миленин // Современные информационные технологии : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – 2013. – Вып. 18. – С. 114 – 116.

2. Валуев, И. К. Повышение эффективности процессов технического обслуживания и ремонта насосного оборудования с помощью методов машинного обучения / И. К. Валуев // Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М) – 2024) : материалы 2-й молодежной конференции с международным участием. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. – С. 171 – 173.

ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

А. Г. Приставка, В. А. Ким, П. А. Цих

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail:pristavka.ag@dvfu.ru, kim.valek@dvfu.ru, tcikh.pa@dvfu.ru)

Проектирование и модернизация сетей передачи данных (ПД) требуют расчета ключевых параметров качества: уровня сигнала, зон покрытия, помехоустойчивости, годовой доступности. Для этого используется специализированное программное обеспечение (ПО). На рынке представлены как зарубежные,

так и отечественные решения, различающиеся функционалом, поддерживаемыми топологиями и соответствием российским нормативам. В статье дан обзор четырех распространенных российских программных продуктов: DRRL 8.0, ПАП-ЦРРЛ, ONEPLAN RPLS-DB Link, RadioPlanner 3.0. Эти инструменты охватывают различные типы сетей – от радиорелейных линий (РРЛ) до систем беспроводного широкополосного доступа (БШД) с топологиями «Точка-Точка» и «Точка-Многоточка».

DRRL 8.0 – программа, предназначенная для планирования и расчета качественных показателей как отдельных РРЛ, так и сетей радиодоступа [1]. Поддерживает диапазон частот от 140 МГц до 86 ГГц. Позволяет выполнять оптимизацию высот и диаметров антенн, рассчитывать зоны радиопокрытия и интерференции, а также формировать отчеты в соответствии с ГОСТ. В качестве картографической подложки может использовать OpenStreetMap, Google, Bing и другие тайловые серверы.

ПАП-ЦРРЛ (Программа автоматизированного проектирования цифровых радиорелейных линий связи) – программа проектирования РРЛ прямой видимости (до 100 ГГц) [2]. Выполняет расчет просветов, дифракционных потерь, высот подвеса антенн. Строго соответствует методике, одобренной «Главгосэкспертизой России», но ограничена топологией «Точка-Точка».

ONEPLAN RPLS-DB Link – функциональный модуль, предназначенный для планирования и оптимизации транспортных сетей на РРЛ [3]. Поддерживает диапазон 100 МГц – 350 ГГц, работает с топологиями «Точка-Точка» и «Точка-Многоточка», обеспечивает частотное планирование, оценку электромагнитной совместимости (ЭМС), формирование отчетов и заявок в ГРЧЦ.

RadioPlanner 3.0 – программа для частотно-территориального планирования мобильных сетей, беспроводных сетей интернета вещей, а также наземного радио- и телевещания. Позволяет рассчитывать потери сигнала, уровни помех, выполнять групповой расчет для абонентских устройств. Основной акцент – анализ частотных помех.

В таблице 1 представлены основные характеристики перечисленных программных продуктов.

Анализ возможностей рассмотренных программ показывает, что выбор конкретного инструмента зависит от решаемой задачи. ПАП-ЦРРЛ – стандарт для проектирования классических РРЛ при необходимости госэкспертизы. ONEPLAN RPLS-DB Link предоставляет мощные средства для частотного планирования и оценки ЭМС в транспортных сетях. RadioPlanner 3.0 оптимален для планирования с большим числом абонентских устройств. DRRL 8.0 выделяется комплексным подходом, поддерживая обе топологии и позволяя детально прорабатывать как отдельные интервалы, так и сети радиодоступа.

Таким образом, современный рынок ПО для расчета качественных показателей сетей ПД предлагает как узкоспециализированные, так и универсальные решения. При выборе инструмента следует учитывать требуемые функции, нормативные ограничения, а также тип сети (РРЛ, БШД, смешанная). Наличие встроенных карт, поддержка актуальных диапазонов частот и возможность формирования отчетности по ГОСТ существенно ускоряют проектирование.

1. Сравнение ПО для расчета качественных показателей сетей ПД

Параметр	DRRL 8.0	ПАП-ЦРРЛ	ONEPLAN RPLS-DB Link	RadioPlanner 3.0
Поддерживаемые топологии	Точка-Точка, Точка-Многоточка	Точка-Точка	Точка-Точка, Точка-Многоточка	Точка-Точка, Точка-Многоточка
Основное назначение	Комплексное проектирование РРЛ и сетей радиодоступа	Проектирование РРЛ прямой видимости	Планирование и оптимизация сетей	Частотно-территориальное планирование сетей связи
Диапазон частот	140 МГц… 86 ГГц	до 100 ГГц	100 МГц… 350 ГГц	Не ограничен (зависит от данных оборудования)
Расчет зон покрытия	Да	Нет	Да	Да
Формирование отчетов по ГОСТ	Да	Да	Да (включая заявки в ГРЧЦ)	Ограничено
Картографическая подложка	OpenStreetMap, Google, Bing, ТОРО СТТ	Собственные профили	Корпоративные базы данных, карты	Поддерживается

Библиографический список

1. DRRL 8.0: Руководство пользователя по расчету параметров радиорелейных линий / CTT Group. – М., 2023.

2. ПАП-ЦРРЛ: Программа автоматизированного проектирования цифровых радиорелейных линий. Руководство оператора. – М. : Всерадиософт, 2022. – 145 с.

3. ONEPLAN RPLS-DB Link: Модуль планирования транспортных сетей. Техническая документация. – М., 2023.

4. RadioPlanner 3.0: Система частотно-территориального планирования. Руководство администратора. – М., 2024. – 98 с.

КОГНИТИВНОЕ РАДИО: К ВОПРОСУ О МЕЖУРОВНЕВОЙ АРХИТЕКТУРЕ СЕТЕЙ

И. Л. Пуговкин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: gta.vice.city.1.0.7@gmail.com)

В отчете МСЭ-R SM.2152 было дано принятое наукой определение когнитивного радио, которое рассматривается как радиосистема, основанная на использовании технологии, чьей задачей является получение знания о своей эксплуатационной и географической средах, о принятых и установленных правилах и о собственном внутреннем состоянии. Данная система имеет способности к динамической и автономной корректировке собственных эксплуатационных параметров и протоколов на базе полученных знаний, с целью достижения заранее поставленных результатов, на основе которых система может и учиться [1].

Исследователи отмечают, что в создании новой парадигмы создания инфокоммуникационных технологий и систем связи когнитивное радио занимает значимое место. РЭС инфокоммуникационных технологий и систем связи отличаются особыми уникальными свойствами: они умеют проводить подробный анализ окружающей среды, обучаться на основе этих данных и делать соответствующие выводы. Процесс обучения и принятия решения РЭС именуется когнитивным циклом.

Современные системы связи проектируются на основе модели OSI (модель взаимодействия открытых систем). Каждый из уровней системы создается автономно и может быть модифицирован или расширен без воздействия на компоненты других уровней. На каждом уровне имеется определенный уникальный интерфейс. Эти интерфейсы позволяют оборудованию различных производителей взаимодействовать друг с другом. Важно отметить, что все операции между уровнями осуществляются от высшего к низшему, последовательно, что приводит к издержкам в вычислениях и большим задержкам. По причине уровневой изолированности высший уровень не может получать информацию о низшем, что приводит к ограничению взаимодействия уровней.

Развитие такой системы уровней обусловило создание новых видов межуровнего взаимодействия. Например, к резервированию функций одного из уровней, связанных с контролем ошибки на физическом и канальном уровнях. Системы межуровневого взаимодействия имеют следующую главную цель – увеличение информационного потока между уровнями.

Взаимодействие, например, может осуществляться двумя способами: от высшего уровня к низшему и от низшего к высшему. Так, с канального уровня информация о скорости передачи в канале может передаваться на уровень приложений и таким образом изменять скорость кодирования видеопотока в соответствующем приложении. Закономерность такова: если скорость передачи в канале уменьшается, то скорость видеосжатия тоже уменьшается. Уров-

ни могут быть объединены с целью интегрирования их функций. Например, канальный и транспортный уровни могут быть объединены для совместного обеспечения управления очередями и доступа к каналу [2].

Теория межсетевого взаимодействия предполагает создание единого интерфейса для обмена данными и контролем между всеми уровнями.

Принцип действия когнитивного радио описывается с использованием понятий «измеритель» и «изменяемый параметр». Показания измерителя отражают текущее значение измеряемого параметра, после чего параметр может быть изменен для получения новой характеристики.

Таким образом, действие – не что иное как установка параметров когнитивного радиоустройства для получения необходимой производительности, т.е. характеристик. При проектировании когнитивного радиоустройства закладывает такое количество изменяемых параметров, при котором характеристики устройства должны меняться максимально эффективно для осуществления всех функций [2].

Удобно разделить, по мнению исследователей, управляемые параметры по уровням телекоммуникационной системы. На каждом уровне свои параметры для изменения [2]. На физическом уровне: мощность передачи, вид модуляции, частота несущей, ширина полосы частот. На канальном: тип пакета, величина пакета, скорость передачи, протокол передачи. На сетевом и транспортном уровнях: алгоритм планирования сети, параметры протокола. На уровне приложений: вид сжатия или кодирования.

Информация, собираемая когнитивным радио обширна, и радиоинтерфейсу необходимо выделять только нужную информацию. Для этого специалисты рекомендуют использовать алгоритм нечеткой логики. В такой системе параметры протоколов на различных уровнях могут быть смоделированы как переменные нечеткой логики, управляемые контроллером нечеткой логики.

Библиографический список

1. Отчет МСЭ-R SM.2152 Определения системы радиосвязи с программируемыми параметрами (SDR) и системы когнитивного радио (CRS). – МСЭ, 2009. – URL : h_f78e12d30f93fa2ce77ae42b7c6b9939 (дата обращения: 06.05.2026).

2. Мирошникова, Н. Е. Обзор систем когнитивного радио / Н. Е. Мирошникова // T-Comm. – 2013. – № 9. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sistem-kognitivnogo-radio (дата обращения: 06.05.2026).

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗОН НИЗКОГО КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ В СЕТЯХ LTE-A НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ ENB

К. С. Сайфуллозода

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Sqiyom@bk.ru)

Сети LTE-Advanced обеспечивают высокие скорости передачи данных и низкую задержку, однако их потенциальная эффективность существенно снижается в условиях неравномерного покрытия, вызванного особенностями городской застройки, рельефа местности, а также изменениями нагрузки. Зоны с низким качеством покрытия характеризуются: уровнями RSRP (Reference Signal Received Power), показатель мощности сигнала LTE-A в дБм (dBm), ниже –115 дБм, низким SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio); ключевой показатель качества LTE-A сигнала, определяющий скорость интернета (< 0 дБ), RSRQ (Reference Signal Received Quality) показатель качества LTE-A сигнала от –10 дБ и выше, повышенной вероятностью неудачных попыток случайного доступа и частыми разрывами соединения при хэндовере. Классические методы оптимизации покрытия ручной настройки параметров eNodeB на основе drive-test трудоемки, не оперативны и не масштабируемы.

В рамках концепции Self-Organizing Networks (SON) востребованы алгоритмы автоматической идентификации слабых зон. Существующие решения часто используют пороговые правила либо изолированные *ML*-модели, но не учитывают связь между идентификацией и последующей оптимизацией параметров, что может приводить к ухудшению [1, 2]. Пусть имеется множество сот $C = \{c_1, c_2, ..., c_N\}$, для каждой из которых известны настраиваемые параметры: $Ptx(i)$ – мощность опорного сигнала, $Tilt(i)$ – электрический наклон (в градусах), $CIO(i, j)$ – индивидуальное смещение соты j относительно соты i для инициации хэндовера; процедура выявления проблемных областей покрытия строится как двухуровневый алгоритм.

Шаг 1. Предварительная фильтрация и привязка к сотам. Из сырых измерений (журналы eNB) отбираются точки с RSRP < –110 дБм.

Шаг 2. Пространственная кластеризация. Данный параметр выбран эмпирически для типовой городской среды.

Шаг 3. Классификация кластеров по типам RSRP, RSRQ, SINR, процент неудачных попыток, количество хэндоверов A3 на кластер.

Измерения от пользовательских устройств (ENB) в дискретные моменты времени формируют множество точек $M = \{m_k\}$, каждая точка содержит: координаты (x, y), время t, $RSRP$, $RSRQ$, $SINR$. Необходимо автоматически идентифицировать кластеры точек $M_{\text{weak}} \subset M$, где $RSRP < -115$ дБм и $SINR < -3$ дБ, для каждого идентифицированного кластера определить множество кандидатов и сформировать такой вектор $\boldsymbol{F}$ параметров, который минимизирует взвешенную сумму:

$$F = W_1 \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{weak}}} + W_2 H_{\text{fail}} + W_3 I_i, \quad (1)$$

где A_{weak} – площадь слабых зон после оптимизации; H_{fail} – количество неудачных хэндоверов; I_i – среднее увеличение уровня интерференции на соседних сотах; W_1 – веса, задаваемые оператором.

Таким образом, алгоритмы для автоматической идентификации и оптимизации зон с низким качеством покрытия LTE-A являются ключевым элементом в обеспечении стабильной и качественной связи. Проблема низкого качества покрытия LTE-A является сложной и многогранной, и ее решение требует комплексного подхода. На основе проведенного анализа существующих методов от автономной оптимизации покрытия и кластеризации до применения генетических алгоритмов и машинного обучения в SON применяемая комплексная методика гарантирует пользователям безупречный уровень сервиса

Библиографический список

1. Березин, А. А. Методы самоорганизации в сетях мобильной связи стандарта LTE-A / А. А. Березин, В. Г. Петров // Инфокоммуникационные технологии. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 411 – 418.

2. Применение алгоритмов нечеткой логики в системе управления диаграммообразующим устройством гибридной зеркальной антенны / О. А. Белоусов, Е. В. Рязанов, А. С. Колмыкова, А. И. Дякин // Программные продукты и системы. – 2018. – № 4, Т. 31. – С. 757 – 762.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЗОН ПОКРЫТИЯ СЕТИ НА ОСНОВЕ МОЩНОСТИ СИГНАЛА И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

К. С. Сайфуллозода

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Sqiyom@bk.ru)

Современные сети мобильной связи формируют огромные объемы эксплуатационных данных: статистику качества канала, параметры радиосигнала, нагрузку на соты и др. Одной из важнейших задач является расчет зон покрытия сети – определение географической области, в пределах которой обеспечивается уверенный прием сигнала с требуемой скоростью передачи данных. Ключевыми метриками для оценки покрытия традиционно выступают мощность принимаемого сигнала и скорость передачи данных. Традиционные методы расчета, основанные на детерминированных и эмпирических моделях распространения радиоволн (таких как COST231-Хата или SUI), часто не способны в полной мере учесть всю сложность реальной среды: переменчивый рельеф, плотную городскую застройку, интерференцию и динамически меняющуюся нагрузку на сеть [1, 2].

Расчет скорости передачи данных в LTE с учетом мощности сигнала и скорости (RSRP + Throughput) усовершенствованная методика: в отличие от классического подхода, где скорость рассчитывается теоретически, данный

метод использует реальные показатели сети: RSRP (Reference Signal Received Power) – уровень принимаемого сигнала. Фактическая скорость передачи данных (Throughput). SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) – качество радиоканала. Формула адаптивной оценки скорости:

$$Ra = (R_th \times F \times G \times H), \quad (1)$$

где R_th – теоретическая скорость; F(RSRP) – поправочный коэффициент по мощности сигнала; G(SINR) – коэффициент качества канала; H(Throughput_history) – исторические данные по скорости.

Точность оценки может быть дополнительно увеличена за счет расширения набора входных параметров (например, учета текущей загрузки соты) и применения нейросетевых моделей для прогнозирования поведения радиоканала и трафика. Теоретическая скорость (R_theoretical): 150 Мбит/с (20 МГц, 64QAM, 2×2 MIMO), измеренные параметры:

$$R_actual = 150 \times 0{,}6 \times 0{,}6 \times 0{,}8 = 43{,}2 \text{ Мбит/с}.$$

Погрешность метода составляет ~4%. Оценка зон обслуживания: определяются области, где уровень сигнала выше порогового значения, обеспечивая работу сети (табл. 1).

Предложенный метод позволяет: получать реалистичные оценки скорости (в отличие от теоретических максимумов) Оптимизировать сеть на основе реальных данных, улучшать QoS для конечных пользователей. Точность метода может быть повышена за счет увеличения количества учитываемых параметров (например, загрузка соты), использования нейросетевых моделей для прогнозирования.

1. Параметры «Уровень сигнала»

RSRP (дБм)	Коэффициент f(RSRP)	Состояние связи
> –80	1,0	Отличное
–90…–100	0,6	Удовлетворительное
< –110	0,1	Крайне плохое

Библиографический список

1. Ермолаев, С. Ю. Применение генетических алгоритмов для решения задачи оптимального размещения базовых станций / С. Ю. Ермолаев // Цифровая обработка сигналов и ее применение : докл. 10 Междунар. конф (DSPA, Москва, Российская Федерация, 26 – 28 марта 2008). – М. : ИПУ РАН, 2008. – С. 312 – 314.

2. Тришаков, А. А. Способы формирования пространственных сигналов в сетях мобильной связи 5 поколения при реализации технологии mu-mimo и beamforming с использованием высокоэффективных антенных систем / А. А. Тришаков, О. А. Белоусов, М. М. Паршкова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – С. 141 – 143.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

З. М. Селиванова, А. А. Гончарова, У. Ф. Ш. Альхубайши

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: selivanova_zm@mail.ru)

Применяемые материалы при разработке радиоэлектронных средств (РЭС) могут изменять свое состояние, теплофизические свойства, иметь различные виды дефектов. В связи с этим необходимо проверять качество материалов для исключения возможных неисправностей при функционировании РЭС методом неразрушающего контроля (НК) [1]. Применение качественных материалов в РЭС способствует повышению их эффективности за счет улучшения надежности, снижения энергозатрат и увеличения срока службы. Разработана информационно-измерительная система (ИИС) для НК теплофизических свойств (ТФС) применяемых материалов в РЭС (рис. 1).

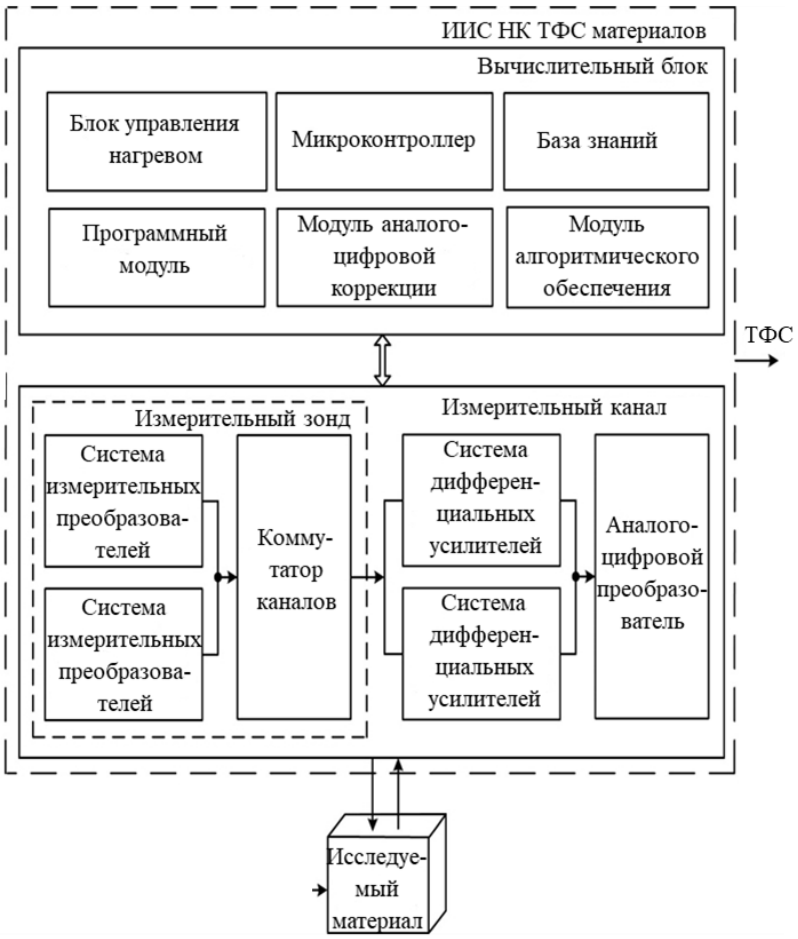


Рис. 1. ИИС НК ТФС применяемых материалов в РЭС

ИИС НК ТФС материалов отличается от известных систем автоматическим переключением диапазонов в интеллектуальном датчике при измерении теплопроводности материалов в соответствии с классом материала по тепло-

проводности [0,02…0,2 Вт/(мК), 0,2…1,0 Вт/(мК)] [2]. Для НК теплопроводности материалов, применяемых при разработке РЭС, предлагается тепловой метод контроля, заключающийся в регистрации температурных полей объекта контроля с использованием измерительного зонда ИИС.

Создан алгоритм с использованием методов искусственного интеллекта (распознавание образов, принятие решений в условиях неопределенности) при НК теплопроводности материалов с использованием ИИС. Алгоритм отличается анализом экспериментальных данных о теплопроводности материалов и большого объема данных, полученных в ИИС; определением отклонения от нормативных параметров и формированием выводов о соответствии материалов, применяемых в РЭС, установленным требованиям ГОСТ [3].

Результаты экспериментального исследования теплопроводности исследуемых материалов с использованием ИИС приведены в табл. 1

1. Эталонные и измеренные значения теплопроводности материалов, погрешность измерения

Материал объекта исследования	Плотность	Справочные значения	Измеренные значения	Относительная погрешность измерения
	P, кг/м^3	λ, Вт/(м·К)	λ, Вт/(м·К)	δ_λ, %
Гетинакс	1350	0,23	0,22	4,35
Стекло-текстолит	955	0,42	0,41	2,38
Керамика	910	0,20	0,19	4,76
Полиэтилен	2100	1,50	1,55	3,33
Полипропилен	2200	0,25	0,26	4,00

Применение качественных материалов при разработке конструкции РЭС в результате неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов позволяет повысить надежность и эффективность функционирования РЭС на 10…15%.

Библиографический список

1. Справочник по конструкционным материалам / Б. Н. Арзамасов и др. ; под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 636 с.

2. Селиванова, З. М. Метод и алгоритм определения теплопроводности материалов при неопределенных условиях / З. М. Селиванова, К. В. Скоморохов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 541 – 553.

3. Полежаев, Ю. В. Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1976. – 392 с.

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ В БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДАХ

З. М. Селиванова, Т. О. Шаталов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: selivanova_zm@mail.ru)

Стелс-технологии широко применяются в беспилотных воздушных судах (БВС) для обеспечения тепловой и визуальной малозаметности в результате применения теплоизолирующих материалов и специальных покрытий, которые рассеивают ИК-излучение. Поэтому контроль качества материалов и теплоизолирующего покрытия БВС с использованием предложенной интеллектуальной системы допускового контроля (ИСДК) теплопроводности покрытий БВС является актуальной и важной задачей.

В БВС применяются материалы, поглощающие радиолокационное излучение. Радиопоглощающие материалы (RAM) включаются в соты или подобную структуру внутри воздухозаборников турбовентиляторов. RAM работают по принципу поглощения БВС энергии электромагнитной волны для минимизации интенсивности отраженного сигнала. К РАМ относятся: резистивные покрытия для нанесения на внешнюю поверхность; магнитодиэлектрические композиты; тепломаскирующие и теплорассеивающие материалы для экранирования горячих частей конструкции и снижения температуры наружных поверхностей; керамические матричные композиты, применяемые в сопловых аппаратах, элементах выхлопных трактов; термобарьеры, используемые в покрытии лопаток турбин и камер сгорания; волокнистые изоляторы для теплоизоляции отсеков двигателя; высокотеплопроводные композиты, которые применяются в конструкционных панелях, теплоотводящих ребрах [1].

Разработанная ИСДК теплопроводности теплоизолирующего покрытия БВС состоит из следующих компонентов: микроконтроллера, устройства сравнения, содержащего расчетные значения, соответствующие заданным нижнему (н) $D_н$ или верхнему значению нормы (в) $D_в$ коэффициента теплопроводности материала; блока синхронизации, базы знаний, блока принятия решений, клавиатуры, а также включает измерительный зонд, устройство сравнения данных и управление экспериментами. Контроль теплопроводности стелс-материалов осуществляется в ИСДК на основе реализации в измерительном зонде теплового метода [2].

В аналоговом канале контроля ИСДК с представленными в цифровом виде двумя нормами ($D_н$ и $D_в$) и устройствами сравнения сигнал x_i от измерительной цепи с датчиками температуры поступает на вход аналоговых устройств сравнения ИСДК. В ходе процесса мониторинга теплопроводности происходит определение принадлежности входного сигнала x_i заданным допустимым значениям (нормам). Сначала рассматривается принадлежность x_i нижнему значению нормы $D_н$, определяется больше значение или меньше, затем рассматривается принадлежность x_i верхнему значению нормы $D_в$. Далее принимается решение, если $D_н \le x_i \le D_в$, то значение контролируемого параметра

принадлежит зоне допуска, если же значение $x_i < D_в$ или $x_i > D_в$, то значение вышло из зоны допуска.

К материалам, используемым в стелс-технологиях в БВС, применяется основное требование: низкая теплопроводность для снижения температурного контраста с окружающей средой, который может изменить тепловое изображение БВС на чувствительной матрице тепловизора.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований теплопроводности стелс-материалов.

1. Результаты экспериментальных исследований теплопроводности материалов для обеспечения малозаметности БВС с использованием ИСДК

Исследуемый материал	Справочные значения	Измеренные значения	Относительная погрешность измерения
	λ, Вт/(м·К)	λ, Вт/(м·К)	δ_λ, %
Титановый сплав	6,25	6,55	4,8
Углепластик	1,15	1,20	4,35
Пластмасса	0,75	0,78	4,00
Стеклопластик	0,36	0,37	2,78
Углеродный войлок	0,55	0,53	3,63

Результаты исследований: выполнен контроль материалов, применяемых для покрытия БВС; создана ИСДК, позволяющая определить соответствие теплопроводности заданному допуску для каждого вида материалов, обеспечивающих малозаметность БВС; ИСДК отличается наличием предложенных базы знаний, модуля допускового контроля и блока принятия решений при оценке качества стелс-материалов; проведены экспериментальные исследования ИСДК теплопроводности материалов с относительной погрешностью не более 5%, что свидетельствует о точности контроля теплопроводности материалов и качестве теплоизолирующих покрытий БВС при реализации стелс-технологий.

Библиографический список

1. Каблов, Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 7 – 17.

2. Стасенко, К. С. Метод и интеллектуальная информационно-измерительная система для повышения точности допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 42 – 49.

АНАЛИЗ ТЕМПОВ ИНТЕГРАЦИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЫ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ СВЯЗИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

М. М. Смирнова, С. В. Брылина, Е. И. Галайда

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: smirnova.mmi@dvfu.ru)

Современные телекоммуникации в России – это сложная, географически распределенная инфраструктура, где скорость и качество связи напрямую зависят от эффективности систем контроля. Примерно с 2020 по 2024 год подходы к управлению сетевой инфраструктурой в России претерпели кардинальные изменения. Драйвером изменений стал синтез трех компонентов: искусственного интеллекта в эксплуатации сетей (AIOps), облачных OSS-платформ и механизмов автономных сетей (SON) [1].

Показателен сам процесс восстановления российской телеком-отрасли после серьезного кризиса 2022 года. На этапе 2019 – 2021 годов безоговорочно лидировали западные технологии: Ericsson ENIQ обеспечивал 38% автоматизации сетевого мониторинга «МегаФона», а Nokia NetAct обрабатывал 51% трафика данных МТС. Санкционные ограничения 2022 года спровоцировали системный провал – отключение ПО Ericsson снизило уровень AIOps до 12%.

Реакцией на кризис стал Национальный план развития телекоммуникаций [2]. В его рамках выделили 214 миллиардов рублей на три ключевые задачи: создание ОС «Росфотон» для базовых станций, разработку платформы РТИ «Сфера» с возможностями предиктивной аналитики, а также интеграцию сенсорных сетей от «Яндекс Погоды» для отслеживания состояния физической инфраструктуры [3].

К концу 2024 года удалось добиться системных сдвигов: Cloud OSS на базе «Ростелеком-Крипто» внедрена на 45% (сетью Tele2 полностью перенесена), SON-алгоритмы Yadro повысили эффективность 65% радиоинтерфейсов, а AIOps-модули Solar MSS обрабатывали 30% всех инцидентов. Однако технологическим лимитом оставалась точность прогнозирования – всего 68% против 93% у Huawei, что было следствием недостатка вычислительных ресурсов для обучения моделей.

В таблице приведены данные, характеризующие динамику внедрения упомянутых технологических решений в сфере мониторинга телекоммуникационных объектов Российской Федерации за период 2020 – 2024 гг.

Благодаря Нацпроекту «Цифровая экономика» и переориентации на азиатских поставщиков Россия успешно прошла трансформацию и совершила рывок на импортозамещенных платформах (РТИ, Solar). Таким образом, можно заключить: отрасль мониторинга объектов связи в России в целом оправилась от кризиса и продолжает постепенно ускорять развитие.

1. Анализ динамики внедрения новых технологий в мониторинге объектов связи в России с 2020 по 2024 годы

Технология	2020	2021	2022	2023	2024	Тренд
AIOps	5...10%	10...15%	10...12%	15...20%	25...30%	Восстановление после спада
Cloud OSS	20...25%	25...30%	15...20%	30...35%	40...45%	Импортозамещение
SON (4G/5G)	35...40%	40...45%	30...35%	50...55%	60...65%	Ускорение для 5G

Библиографический список

1. Levin, Anna. AIOps for a Cloud Object Storage Service [Электронный ресурс] / Anna Levin, Shelly Garion, Elliot K. Kolodner, et al. // 2019 IEEE International Congress on Big Data (BigDataCongress). – 2019. – P. 165 – 169.

2. Об утверждении Национального плана развития телекоммуникаций в Российской Федерации : распоряжение Правительства РФ от 11 июня 2022 г. № 1521-р // Собрание законодательства РФ. – 2022. – № 25. – Ст. 4321.

3. РТИ. Отчет о внедрении платформы «Сфера» в МТС. – М., 2023. – 54 с.

ДИНАМИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ МОДУЛЯЦИИ И КОДИРОВАНИЯ В DWDM-СЕТЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

П. А. Таёнков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: pavel.tayonkov@yandex.ru)

Введение. Когерентные DWDM-системы за последнее десятилетие прошли путь от 100 Гбит/с с DP-QPSK до 800 Гбит/с с вероятностно-формированным 64-QAM на скоростях 95…130 ГБод. Прирост обеспечен не столько расширением полосы, сколько увеличением числа битов на символ – а это упирается в требуемое OSNR и устойчивость к нелинейным искажениям волокна. Оптимум по мощности перестал быть фиксированным: он смещается в зависимости от длины пролета, числа активных каналов, типа волокна и параметров FEC. Статическое назначение схемы передачи оставляет, по разным оценкам, от 25 до 40% спектрального ресурса невостребованным.

Актуальность. К 2025 году емкость одного волокна в C+L-диапазоне достигла 70…80 Тбит/с при спектральной эффективности 6,5…7,5 бит/с/Гц [3]. Запас до предела Шеннона для пролета 100 км по SSMF – порядка 1,5…2 дБ, и закрывают его за счет PCS и LDPC с мягким декодированием. При среднегодовом приросте магистрального IP-трафика 25…30% ввод нового темного волокна оправдан не на каждом направлении, и единственный непрерывно расширяемый ресурс – гибкость распределения форматов и кодовых скоростей по уже работающим линиям.

Проблема. Адаптивный выбор формата упирается в точность оценки бюджета нелинейных искажений. Расширенная гауссова модель (EGN) предсказывает мощность нелинейной интерференции пропорционально кубу мощности запуска, но коэффициент η чувствителен к статистике сигнала: при переходе от равновероятного 16-QAM к PCS-64QAM с энтропией 4,5 бит/символ упрощенная GN-формула занижает реальный NLI на 0,4…0,7 дБ [3, с. 1108]. Зазор кажется небольшим. Однако он накладывается на запас по OSNR, который для 64-QAM не превышает 1…1,5 дБ, и решение о повышении порядка модуляции, принятое по аналитике, оказывается ошибочным. Вторая трудность – корреляция нелинейных эффектов между соседними каналами при сетке 50 ГГц и плотнее; применимость классической GN-модели здесь прямо ставится под сомнение в [3, л. 31 – 38].

Цель работы. Сформулировать алгоритм динамической адаптации формата модуляции и скорости FEC для DWDM-системы C-диапазона с 96 каналами на сетке 50 ГГц, использующий поправленную EGN-модель с учетом особенностей PCS-сигналов, и оценить выигрыш в средней спектральной эффективности относительно статического DP-16QAM.

Преамбула. Расчет построен на типовом пролете 80 км по SSMF (потери 0,22 дБ/км, $\gamma = 1{,}3$ $Вт^{-1}\cdot км^{-1}$, дисперсия 16,7 пс/нм/км) с EDFA шум-фактора 5 дБ. Целевой порог BER до декодера принят $1{,}5\cdot10^{-2}$ (20%-й оверхед SD-FEC LDPC, пост-FEC BER ниже 10^{-15}). Пороги OSNR на 64 ГБод (полоса 0,1 нм) согласованы с цифрами, приводимыми В. Н. Трещиковым в [3]: 13,8 дБ для DP-QPSK; 17,1 дБ для DP-8QAM; 19,9 дБ для DP-16QAM; 23,4 дБ для DP-32QAM; 26,1 дБ для DP-64QAM. Для PCS-64QAM с энтропией 5,2 бит/символ порог снижается до 22,8 дБ. Контроллер на каждом канале максимизирует произведение скорости символа на число информационных битов при марже к порогу не менее 1 дБ; начальная мощность запуска берется из EGN-аналитики и итеративно уточняется по показаниям мониторов Q-фактора. Поправка на PCS-статистику введена через множитель в η, подобранный по 12 измерениям в диапазоне энтропий 4,2…5,6 бит/символ.

На маршруте 600 км алгоритм назначает PCS-64QAM (энтропия 5,2) на 71 канал из 96, DP-16QAM на 18, DP-QPSK на 7 (каналы с худшим PMD и крайние спектрально). Средняя спектральная эффективность поднимается с 4,0 бит/с/Гц при статическом DP-16QAM до 5,4 бит/с/Гц – прирост около 35%. На трассе 1200 км выигрыш скромнее: 4,1 против 3,5 бит/с/Гц, порядка 17%. Свыше 2000 км адаптация теряет смысл – оптимум упирается в DP-QPSK либо DP-8QAM.

Слабое место схемы – чувствительность к точности in-band-измерения OSNR. Стандартные методы дают погрешность 0,3…0,5 дБ, для PCS-сигналов со статистикой, отклоняющейся от гауссовой, – до 0,8 дБ; это съедает заметную часть проектируемого запаса. В [4] показано, что параметры реальной линии дрейфуют до 0,5 дБ за сутки за счет температурных и поляризационных эффектов: контроллер либо периодически перенастраивается с риском кратковременных сбоев, либо закладывает консервативный запас, обнуляющий часть выигрыша от адаптации.

Библиографический список

1. Трещиков, В. Н. Высокоскоростные волоконно-оптические системы связи, их мониторинг и проектирование с учетом нелинейных эффектов : дис. ... д-ра техн. наук: 1.3.19 / В. Н. Трещиков. – М., 2023. – 83 с.
2. Тенденции и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации / В. А. Конышев, А. В. Леонов, О. Е. Наний и др. // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 12. – С. 1102 – 1113.
3. Принципы проектирования современных волоконно-оптических линий связи / В. А. Конышев, О. Е. Наний, А. Г. Новиков и др. / Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, № 12. – С. 1149 – 1153.
4. Проектирование высокоскоростных когерентных линий связи / В. А. Конышев, А. В. Леонов, О. Е. Наний и др. // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 12. – С. 1121 – 1128.

МАРШРУТИЗАЦИЯ И НАЗНАЧЕНИЕ ДЛИН ВОЛН В DWDM-СЕТЯХ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

П. А. Таёнков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: pavel.tayonkov@yandex.ru)

Введение. Когерентные DWDM-магистрали с поляризационным мультиплексированием и форматами PM-QPSK, PM-16QAM, PM-64QAM закрепились в качестве несущей основы магистральных сетей передачи; дальнейший рост канальной скорости упирается уже не в полосу EDFA-усилителя, а в нелинейный отклик кварцевого волокна. Полоса C-диапазона около 4,4 ТГц при сетке 50 ГГц вмещает порядка 96 каналов; уплотнение до 37,5 ГГц при символьной скорости 32 ГБод увеличивает их число, но усиливает межканальное взаимодействие – кросс-фазовую модуляцию и четырехволновое смешение. Классическая постановка задачи маршрутизации и назначения длин волн (RWA), сформулированная для систем «без памяти о физическом уровне», дает в этих условиях оптические тракты, в которых OSNR оказывается ниже расчетного на 1,5…3 дБ, а коэффициент ошибок выходит за порог FEC.

Актуальность. Эксплуатируемые в России магистрали несут трафик 100…400 Гбит/с на канал на пролетах длиной 80…100 км [3]. Переход к 600G и 800G через PM-16QAM и PM-64QAM сопровождается ужесточением требований к OSNR: смена QPSK на 16-QAM требует увеличения OSNR примерно на 6,8 дБ при сохранении BER на уровне 10^{-2}. Запас по нелинейным эффектам сокращается соответственно. Инженерные методики оценки предельной дальности, развитые в монографии Трещикова и Листвина [1, с. 214 – 218] и оформленные в виде эмпирических соотношений в [1, с. 28 – 32], позволяют рассчитать накопление шумов ASE и нелинейного происхождения в линии с фиксиро-

ванной загрузкой. Однако эти методики применяются на этапе проектирования участка, а не на этапе сетевого планирования. Маршрутизатор в действующей сети по-прежнему «не видит» физический уровень и назначает длины волн по эвристикам, индифферентным к нелинейному отпечатку соседей.

Проблема. Целочисленная постановка RWA с ограничениями непрерывности длины волны и непересечения каналов на ребре игнорирует то обстоятельство, что нелинейный шум в канале зависит от занятости соседних спектральных слотов. Чем плотнее упакован спектр вокруг рассматриваемого канала, тем выше вклад XPM; зависимость близка к $1/\Delta f^{2}$ в диапазоне расстроек до 100 ГГц. Один и тот же путь и одна и та же длина волны при разной текущей нагрузке сети дают разный QoT – установленное в момент t решение через час может перестать удовлетворять пороговому BER. Эвристики first-fit, most-used, least-used, разобранные в обзоре [3, с. 1108 – 1110], не учитывают этот эффект.

Гауссова модель нелинейного шума (GN), на которую опираются инженерные оценки в [4, с. 1151], в большинстве рабочих режимов переоценивает мощность NLI на 0,5…1 дБ – особенно при малых символьных скоростях и плотной сетке. Уточненная EGN-модель снимает это смещение, учитывая негауссов характер распределения нелинейного шума, но ее прямое вычисление на каждое решение о маршруте слишком затратно для онлайн-планирования. Возникает несимметричная задача: с одной стороны – точность физического слоя, с другой – масштабируемость на сетях с десятками узлов и сотнями каналов.

Цель работы. Построить алгоритм совместной маршрутизации и назначения длин волн, использующий редуцированную EGN-модель для оценки нелинейного шума в реальном времени и обеспечивающий рост средней спектральной эффективности сети при заданном пороге BER.

Преамбула. В качестве физической модели тракта взято разложение $\mathrm{OSNR}^{-1} = \mathrm{OSNR_ASE}^{-1} + \mathrm{OSNR_NLI}^{-1}$, где нелинейный вклад в линии из N однотипных пролетов аппроксимируется через $\mathrm{P_NLI} = \eta \cdot N^{(1+\varepsilon)} \cdot \mathrm{P_ch}^{3}$. Параметры рассчитаны для стандартного одномодового волокна с $\gamma \approx 1{,}27$ Вт$^{-1}$·км$^{-1}$ и $D \approx 16{,}7$ пс/(нм·км), как принято в [1, с. 28 – 32]; коэффициент когерентного накопления ε для линий 10×100 км лежит в диапазоне 0,04…0,06. Оптимум мощности на канал при таких параметрах приходится на –1…+1 дБм – узкий коридор, выход из которого либо обнажает ASE, либо запускает нелинейный коллапс.

Алгоритм работает в три такта. Сначала между парой узлов запроса строится k-кратчайший набор путей ($k = 3$), отсеченный по физической достижимости при предположении незагруженной сетки. Далее для каждой пары (путь, кандидатная λ) пересчитывается приращение η-коэффициента с учетом текущей загрузки соседних слотов в полосе ±200 ГГц от центра кандидата; ограничение этой полосой опирается на оценки [5, с. 1124], где показано, что вклад каналов вне нее в суммарный NLI не превышает примерно 5%. Третий такт фиксирует вариант с минимальной деградацией Q-фактора, удовлетворяющий пороговому 9,8 дБ для PM-16QAM с SD-FEC 20%; иначе запрос блокируется или уходит на резервный путь.

Имитационное моделирование на топологии 14-узловой сети, повторяющей по структуре российскую магистраль Москва – Дальний Восток, при пуассоновском потоке запросов и средней загрузке 0,6 показало рост средней спектральной эффективности на 12…18% относительно эвристики first-fit; коэффициент блокировок снизился с 4,3 до 1,9%. Прирост достигнут главным образом за счет более рациональной упаковки 64-QAM-каналов на коротких трактах: в эвристическом варианте они вынуждены работать на сниженной мощности из-за соседства друг с другом, а нелинейности – чувствительный алгоритм разносит их по спектру.

Библиографический список

1. Трещиков, В. Н. Высокоскоростные волоконно-оптические системы связи, их мониторинг и проектирование с учетом нелинейных эффектов : дис. … д-ра техн. наук: 1.3.19 / В. Н. Трещиков. – М., 2023. – 83 с.

2. Тенденции и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации / В. А. Конышев, А. В. Леонов, О. Е. Наний // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 12. – С. 1102 – 1113.

3. Принципы проектирования современных волоконно-оптических линий связи / В. А. Конышев, О. Е. Наний, А. Г. Новиков и др. // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, № 12. – С. 1149 – 1153.

4. Проектирование высокоскоростных когерентных линий связи / В. А. Конышев, А. В. Леонов, О. Е. Наний и др. // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 12. – С. 1121 – 1128.

АЛГОРИТМ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ В МНОГОЧАСТОТНЫХ MIMO-РЕШЕТКАХ 6G ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ АБОНЕНТОВ

А. А. Тришаков[1], О. А. Белоусов[1], М. Д. Муромцева[2]

[1]Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: trishakov2016@yandex.ru)
[2]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
(e-mail: mmuromtsewa@mail.ru)

Сети 6G предъявляют повышенные требования к физической безопасности. Энергетическая скрытность – способность минимизировать обнаружение факта передачи перехватчиком – критична для мобильных абонентов спецслужб, промышленного интернета вещей и тактильного интернета [1]. Традиционные методы управления мощностью в MIMO не учитывают угрозу перехвата. Переход к cell-free massive MIMO и OFDM открывает новые степени свободы: адаптивное распределение мощности по частотно-пространственным каналам позволяет создавать «провалы» в направлении перехватчика, сохраняя качество связи легального абонента.

Рассмотрим систему cell-free MIMO-система с M распределенными точками доступа (Access Points, AP) и N поднесущими OFDM. Канал от m-й AP к легальному абоненту на n-й поднесущей $h_{m,n}$, к перехватчику – как $g_{m,n}$ мощность излучения $p_{m,n}$, ограничена суммарным бюджетом $P_{\max}$.

Принимаемый сигнал на легальном абоненте на n-й поднесущей:

$$y_n = \sum_{m=1}^{M} h_{m,n}\sqrt{(p_{m,n})}s_n + w_n .$$

Аналогично, сигнал, принимаемый перехватчиком:

$$z_n = \sum_{m=1}^{M} g_{m,n}\sqrt{(p_{m,n})}s_n + v_n .$$

Условие скрытности: мощность сигнала у перехватчика не должна превышать порог обнаружения δ.

Целевая оптимизационная задача: максимизировать спектральную эффективность легального абонента при ограничениях на суммарную мощность и скрытность:

$$\max_{p_{m,n}} = \sum_{n=1}^{N} \log_2(1 + SINR_n^{UE})$$

при ограничениях:

1. Суммарная мощность: $\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} p_{m,n} \le P_max.$

2. Неотрицательность мощности: $p_{m,n} \ge 0.$

3. Условие скрытности: $\sum_{m=1}^{M}\left|g_{m,n}\right|^2 p_{m,n} \le .\delta_n, \forall n.$

Задача выпуклая и решается методами множителей Лагранжа или внутренней точки [2]. Отличительная черта – частотно-селективное регулирование: мощность концентрируется на поднесущих с низким $\left|g_{m,n}\right|^2$ (плохим для перехватчика) и обнуляется на частотах, где перехватчик имеет высокую чувствительность.

Для практической реализации предлагается итеративный алгоритм:

1. Оценка каналов $h_{m,n}$ и $g_{m,n}$ (канал к перехватчику может оцениваться по его пилотным сигналам, если он активен, либо по косвенным признакам).

2. Начальное распределение мощности (например, равномерное).

3. Расчет текущего уровня мощности на перехватчике.

4. Если условие скрытности нарушается, запускается процедура оптимизации: мощность перераспределяется с поднесущих с высоким $\left|g\right|^2$ на поднесущие с низким $\left|g\right|^2$.

Повтор шагов 3–4 до сходимости.

Сценарий: M = 16 распределенных AP, одна поднесущая (для простоты). Каналы – релеевские с частотно-селективными замираниями. Сравнивались классический алгоритм максимизации SNR (без учета скрытности) и предложенный алгоритм. Результаты:

• Предложенный алгоритм обеспечивает снижение мощности излучения в направлении перехватчика на 10…15 дБ.

• Потери спектральной эффективности для легального абонента составляют менее 10…15%.

• Наибольшая эффективность достигается в многолучевых каналах, где всегда находятся поднесущие с низким коэффициентом передачи к перехватчику.

Cell-free архитектура дополнительно повышает скрытность за счет пространственного усреднения сигнала от множества AP, что затрудняет определение направления на источник перехватчиком [3].

Таким образом частотно-селективный алгоритм управления мощностью для MIMO-решеток 6G повышает энергетическую скрытность мобильных абонентов. Алгоритм удерживает мощность у перехватчика ниже порога обнаружения при допустимых потерях спектральной эффективности. Дальнейшие исследования направлены на учет ошибок оценки канала перехватчика, применение методов машинного обучения для прогнозирования его местоположения и интеграцию с RIS для динамического формирования радиотени.

Библиографический список

1. Бакулин, М. Г. Интеграция технологии DFTN с MIMO для повышения спектральной эффективности в сетях следующего поколения / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. А. Резнев // Электросвязь. – 2025. – № 12. – С. 2 – 11.

2. Федосов, В. П. Оптимизация адаптивного пространственно-временного алгоритма в мобильной и базовой станциях связи в системе MIMO с кодом Рида-Соломона / В. П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С. В. Кучерявенко // Радиотехника. – 2025. – Т. 89, № 6. – С. 60 – 67.

3. Фам, К. К., Исследование и разработка алгоритмов обработки сигналов в системах MIMO с применением пространственно-временных кодов / К. К. Фам, Е. И. Глушанков // Информационно-управляющие системы. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 59 – 70.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ RIS И ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ В 6G-СЕТЯХ

А. А. Тришаков[1], О. А. Белоусов[1], М. Д. Муромцева[2]

[1]Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: trishakov2016@yandex.ru)
[2]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
(e-mail: mmuromtsewa@mail.ru)

Сети шестого поколения (6G) предъявляют жесткие требования к энергоэффективности, пропускной способности и покрытию. Одними из ключевых технологий, призванных обеспечить эти требования, являются интеллектуальные метаповерхности (RIS – Reconfigurable Intelligent Surfaces). RIS представ-

ляет собой двумерную решетку из пассивных отражающих элементов с перестраиваемыми фазовыми сдвигами, что позволяет управлять отраженным полем без использования активных усилителей [1].

Целью данной работы является разработка и исследование алгоритма совместной оптимизации, обеспечивающего максимальное отношение сигнал/шум (SNR) в точке приема при минимальных вычислительных затратах, пригодного для работы в реальном масштабе времени.

Рассмотрим систему: БС с N антенными элементами (равномерная линейная решетка), RIS с M отражающими элементами (прямоугольная сетка), один легальный абонент с одной антенной. Канал от БС к RIS: $H \in \mathbb{C}^{M\times N}$, от RIS к абоненту: $f \in \mathbb{C}^{M}$, прямой канал от БС к абоненту: $h_d \in \mathbb{C}^{N}$.

Сигнал на входе абонента:

$$y = (h_d^T + f^T \Phi H) w s + n,$$

где $w \in \mathbb{C}^N$ – вектор формирователя луча БС (единичная норма); $\Phi = diag(e^{\{j\varphi_M\}}, ..., e^{\{j\varphi^1\}})$ – диагональная матрица фазовых сдвигов RIS; s – символ данных; n – шум.

Требуется максимизировать мощность сигнала в абоненте:

$$\max^2_{\{w,\Phi\}} \left| (h_d^T + f^T \Phi H) w \right|$$

при ограничениях $\|w\|^2 = 1$, $\varphi_m \in \mathcal{F}$, где $\mathcal{F}$ – конечное множество возможных фаз (например, $\left\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\right\}$ для 2-битного RIS).

Задача является NP-трудной из-за дискретных фаз и невыпуклой целевой функции. Предлагаемый подход – декомпозиция на подзадачи с использованием метода ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) [3] с мягким проектированием на дискретное множество.

Алгоритм работает итеративно, чередуя шаги:

1. Фиксируем **Φ**, решаем задачу оптимального **w** – это стандартная задача максимизации SNR при единичной норме. Оптимум достигается при $w = v\|v\|^2$, где $v = h_d + H^T \Phi^T f$. (Вычисляется за $O(NM)$).

2. Фиксируем **w**, обновляем **Φ**. Для каждого m задача распадается, но из-за связи через **w** требуется совместная оптимизация. Вводим вспомогательные переменные $u = \left[e^{\{j\varphi^1\}}, ..., e^{\{j_M\}}\right]^T$ и решаем.

$$\max^2_{\{u,z\}} \left| a^T u + b \right|,$$

где $a = diag(f) H w$, $b = h_d^T w$, при этом $u = z$ и $|z_m| = 1 u = z$, а фаз z_m принадлежат дискретному набору.

Применяем ADMM: формируем лагранжиан с дополнительным штрафным членом:

$$L_{\rho(u,z,\lambda} = -\left|a^T u + b\right|^2 + (\rho/2)\|u - z\|_2^2 + \lambda^T (u - z)$$

Итерации ADMM:

• Обновление **u**: решается задача безусловной максимизации – имеет аналитическое решение через проекцию на единичную окружность (после линеаризации квадратичного члена).

• Обновление **z**: проекция полученного **u** на дискретное фазовое множество (покомпонентно, ближайшая допустимая фаза).

• Обновление двойственных переменных λ.

Повтор шагов 1–2 до сходимости по изменению SNR (обычно 5 – 10 итераций).

Параметры модели: N = 16, M = 64 (RIS 8×8), дискретные фазы 2 бита (0°, 90°, 180°, 270°). Каналы – релеевские замирания с добавленной прямой видимостью (Rician-фактор 3 дБ). Сравнивались три алгоритма:

Рандомный RIS: SNR = 5,2 дБ (отн. ед.).

Раздельная оптимизация: SNR = 8,1 дБ (прирост +2,9 дБ).

Предложенный ADMM: SNR = 12,5 дБ (прирост +7,3 дБ относительно рандома, +4,4 дБ относительно раздельной схемы).

Вычислительные затраты на одну итерацию ADMM составили $O(NM) + M^2$); за 8 итераций алгоритм сходился к стабильному решению. Время расчета на Python (CPU Intel i5) – 12 мс, что позволяет использовать алгоритм в периоде когерентности канала (менее 100 мс для медленно движущихся абонентов).

Также исследовалась устойчивость к ошибкам оценки канала. При ошибке до 10% по амплитуде и 15° по фазе предложенный алгоритм сохранял преимущество в 3…4 дБ над раздельной настройкой.

Разработан итеративный алгоритм совместной оптимизации фазовых сдвигов RIS и диаграммы направленности БС на основе ADMM. Алгоритм позволяет учитывать дискретность фаз RIS и обеспечивает повышение SNR на 4…7 дБ по сравнению с раздельными подходами. Вычислительная сложность линейна по числу элементов RIS и подходит для практической реализации в сетях 6G. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учет ограниченной скорости обмена информацией между БС и контроллером RIS, а также на адаптацию алгоритма к распределенным RIS в Cell-Free архитектуре [4].

Библиографический список

1. Бакулин, М. Г. Интеграция технологии DFTN с MIMO для повышения спектральной эффективности в сетях следующего поколения / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. А. Резнев // Электросвязь. – 2025. – № 12. – С. 2 – 11.

2. Бобров, Е. А. Адаптивный регуляризованный, форсирующий нули метод формирования луча в Massive MIMO с многоантенными абонентами /

Е. А. Бобров, Д. С. Миненков, Д. А. Юдаков // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2025. – Т. 29, № 3. – С. 78 – 118.

3. Федосов, В. П. Оптимизация адаптивного пространственно-временного алгоритма в мобильной и базовой станциях связи в системе MIMO с кодом Рида-Соломона / В. П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С. В. Кучерявенко // Радиотехника. – 2025. – Т. 89, № 6. – С. 60 – 67.

4. Широкополосная антенна коротковолнового диапазона, состоящая из несимметричных вибраторов / А. Н. Сысоев, Д. Ю. Муромцев, О. А. Белоусов, А. А. Тришаков // Радиотехника и связь. – 2025. – Т. 21, № 4 (2025) : Вестник Воронежского государственного технического университета. – С. 135 – 138.

АНАЛИЗ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГОРОДЕ ТАМБОВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ XGBOOST

И. В. Тюрин, Ф. Саади

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tyrinilja@yandex.ru; firassaadi358@gmail.com)

Для эффективного использования солнечной энергии важно не только знать средние климатические значения, но и понимать, как солнечное излучение меняется в течение суток и года. Особенно это заметно для Тамбова, где умеренно-континентальный климат приводит к резкому отличию зимних и летних условий [3]. В таких условиях расчеты по справочным данным дают лишь общее представление и не всегда помогают выбрать режим эксплуатации солнечной установки. Поэтому в работе были рассмотрены годовые измерения солнечной радиации для города Тамбова и выполнена их предварительная обработка: удаление пропусков и выбросов, расчет временных признаков, выделение сезонных и месячных закономерностей. Для прогноза использована модель XGBoost, которая хорошо подходит для задач с нелинейными зависимостями и позволяет учитывать связь между временем наблюдения, астрономическими параметрами и фактической интенсивностью излучения [1].

Анализ показал ожидаемую, но важную для практики картину: минимальные значения наблюдаются зимой, а наиболее благоприятный период приходится на апрель – август. Средняя сезонная интенсивность составляет примерно 45,23 Вт/м² зимой, 195,03 Вт/м² весной и 240,95 Вт/м² летом. В месячном распределении максимум отмечен в июле, когда среднее значение достигает 260,62 Вт/м², тогда как в декабре оно снижается до 16,38 Вт/м². Такое различие показывает, что солнечные энергетические системы в регионе должны проектироваться с учетом сезонного запаса и возможности накопления энергии [2]. Модель XGBoost достаточно точно повторяет годовой ход радиации: она воспроизводит дневные пики, ночные минимумы и плавное увеличение излучения от зимы к лету, что видно по сравнению фактических и расчетных значений (рис. 1).

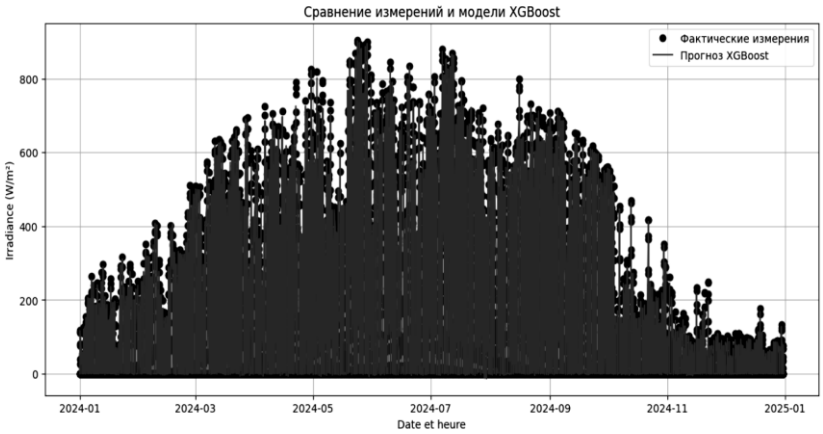


Рис. 1. Сравнение фактических измерений солнечного излучения и прогноза модели XGBoost

Небольшие расхождения между измерениями и прогнозом чаще всего связаны с погодными факторами, которые трудно описать только календарными и астрономическими признаками: облачностью, влажностью, осадками и прозрачностью атмосферы [4]. Тем не менее полученный результат показывает, что локальная модель может быть полезна для планирования работы солнечных панелей и тепловых установок. В весенне-летний период целесообразно ориентировать эксплуатацию на максимальное использование солнечного ресурса, а в зимние месяцы заранее предусматривать аккумуляторы или тепловые накопители. Перед началом сезона высокой генерации важно проводить очистку панелей, проверять состояние аккумуляторов и корректировать угол наклона оборудования [2]. Таким образом, сочетание локальных данных и модели XGBoost дает практический инструмент для оценки солнечного потенциала Тамбова и может использоваться при проектировании более устойчивых энергетических систем.

Библиографический список

1. Chen, T. XGBoost: A scalable tree boosting system / T. Chen, C. Guestrin // Proc. 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785 – 794.

2. Duffie, J. A. Solar Engineering of Thermal Processes / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 928 p.

3. Иванов, И. И. Солнечная энергетика и климатические факторы / И. И. Иванов. – М. : Энергоатомиздат, 2021. – 320 с.

4. NASA POWER Data Access Viewer: Database of meteorological and solar parameters. – URL : https://power.larc.nasa.gov/ (дата обращения: 15.01.2026).

ГИБРИДНОЕ ФИЗИКО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ЧЕТЫРЕХМЕРНЫХ ДАННЫХ

И. В. Тюрин, Ф. Саади

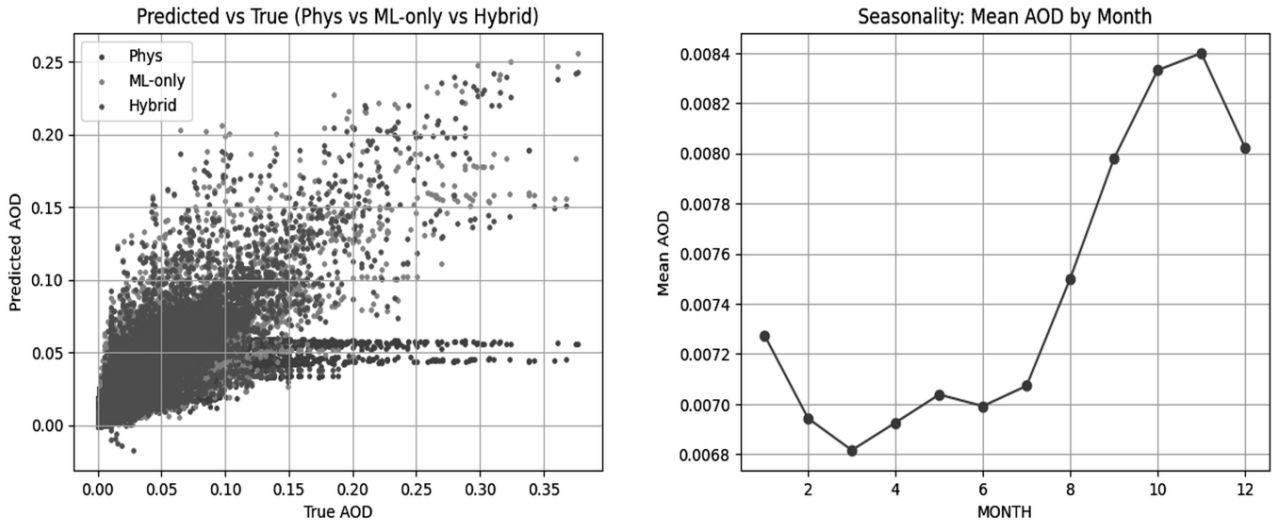
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tyrinilja@yandex.ru; firassaadi358@gmail.com)

Оценка аэрозольной оптической толщины остается важной задачей для мониторинга качества воздуха, анализа климата и интерпретации спутниковых наблюдений [1, 2]. На практике простой физической модели часто недостаточно: она хорошо объясняет общий ход процесса, но сглаживает локальные источники аэрозолей и хуже передает сезонные изменения. Полностью машинное обучение, наоборот, может уловить сложную структуру данных, однако без физической основы его результат труднее интерпретировать. Поэтому в данной работе использован компромиссный подход: сначала строится прозрачная физическая оценка, а затем модель машинного обучения уточняет ее за счет прогноза остаточной ошибки. Для проверки метода был сформирован синтетический глобальный набор данных, в котором учитывались широта, долгота, высота и месяц наблюдения. Поверхностное поле включало фоновый океанический вклад и несколько зон повышенной аэрозольной нагрузки, связанных с пылью, промышленными выбросами и биомассным горением; изменение по высоте задавалось экспоненциальным ослаблением. Такой набор данных удобен тем, что позволяет заранее контролировать шум, вертикальную структуру и сезонность, а затем проверить, насколько разные модели способны восстановить известную закономерность.

Физический блок описывает аэрозольную оптическую толщину как произведение полиномиального поверхностного поля второго порядка, вертикального экспоненциального профиля и сезонного синусоидального множителя. Модель машинного обучения построена на градиентном бустинге над решающими деревьями [3]. Рассматривались три варианта: только физическая параметризация, прямой прогноз аэрозольной оптической толщины и гибридная схема, в которой алгоритм обучается не самому значению, а разности между наблюдением и физическим прогнозом. Для проверки использовано временное разбиение: месяцы 1 – 9 применялись для обучения, а месяцы 10 – 12 оставлялись для тестирования. Такой вариант проверки ближе к реальной ситуации, когда модель должна работать на последующем периоде, а не только на случайно перемешанных данных.

Результаты показывают, что физическая модель дает понятную, но слишком сглаженную картину: RMSE составляет 0,01712, а R^2 – 0,2797. Прямая модель машинного обучения заметно уменьшает ошибку (RMSE = 0,00944; R^2 = 0,7810), но наилучший результат получен при остаточном обучении:

RMSE = 0,00887, MAE = 0,00327 и R^2 = 0,8064. Это означает, что физическая часть задает устойчивую базовую зависимость, а машинное обучение корректирует именно те участки, где простая параметризация теряет детали. Такой подход удобен для задач, где важны одновременно точность и объяснимость результата. В дальнейшем модель целесообразно расширить за счет пространственно меняющегося вертикального масштаба и оценки неопределенности прогноза, что позволит лучше учитывать региональные особенности аэрозольного распределения.



а) *б*)

Рис. 1. Сравнение истинных и расчетных значений аэрозольной оптической толщины, а также сезонная динамика среднемесячных значений

Библиографический список

1. Holben, B. N. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker et al. // Remote Sensing of Environment. – 1998. – V. 66, No. 1. – P. 1 – 16.

2. Levy, R. C. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean / R. C. Levy, S. Mattoo, L. A. Munchak et al. // Atmospheric Measurement Techniques. – 2013. – V. 6. – P. 2989 – 3034.

3. Friedman, J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine / J. H. Friedman // The Annals of Statistics. – 2001. – V. 29, No. 5. – P. 1189 – 1232.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОГО СОЛНЕЧНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

И. В. Тюрин, Ф. Саади

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tyrinilja@yandex.ru; firassaadi358@gmail.com)

Повышение энергоэффективности систем горячего водоснабжения зданий является одной из ключевых задач современной энергетики. Особый интерес представляют гибридные солнечные водонагреватели, в которых солнечный тепловой контур сочетается со вспомогательным источником тепла. Такая схема позволяет использовать возобновляемую энергию при сохранении требуемой надежности горячего водоснабжения, однако эффективность ее работы во многом определяется не только конструктивными параметрами оборудования, но и качеством измерения, обработки данных и алгоритмами управления [1].

Актуальность разработки системы управления для гибридного солнечного водонагревателя обусловлена необходимостью согласования нескольких групп факторов: изменчивости солнечного ресурса, неравномерности водоразбора, тепловой инерционности бака-аккумулятора и ограничений, связанных с работой насосов и вспомогательного источника тепла. В простейших системах обычно применяется пороговое управление, основанное на текущих показаниях датчиков температуры. При таком подходе решение о включении насоса или догревателя принимается по фиксированным настройкам, без учета прогноза погоды и ожидаемого спроса. Это приводит либо к преждевременному включению вспомогательного источника, либо к недостаточному использованию солнечной энергии [2].

Предлагаемая структура системы (рис. 1) включает подсистему измерения и сбора данных, подсистему предварительной обработки информации, модуль оценки состояния и прогнозирования, модуль оптимального управления и исполнительный уровень. На этапе измерения регистрируются температуры в характерных точках установки, расход теплоносителя, состояние насосов, параметры бака-аккумулятора и режимы работы вспомогательного источника. Параллельно используются внешние метеорологические данные: интенсивность солнечной радиации, температура наружного воздуха и краткосрочный прогноз погодных условий.

Ключевым элементом такой системы является модельно- и прогнозно-ориентированное управление. В отличие от локального порогового регулирования, оно позволяет учитывать будущие изменения солнечного ресурса и потребления горячей воды, а также выбирать режим работы оборудования

на заданном горизонте управления. Оптимизационный модуль формирует допустимые управляющие воздействия с учетом температурных ограничений бака, ограничений по расходу теплоносителя, мощности вспомогательного источника и санитарных требований к горячему водоснабжению. В результате решение принимается не только по текущему состоянию объекта, но и по ожидаемому сценарию его развития.

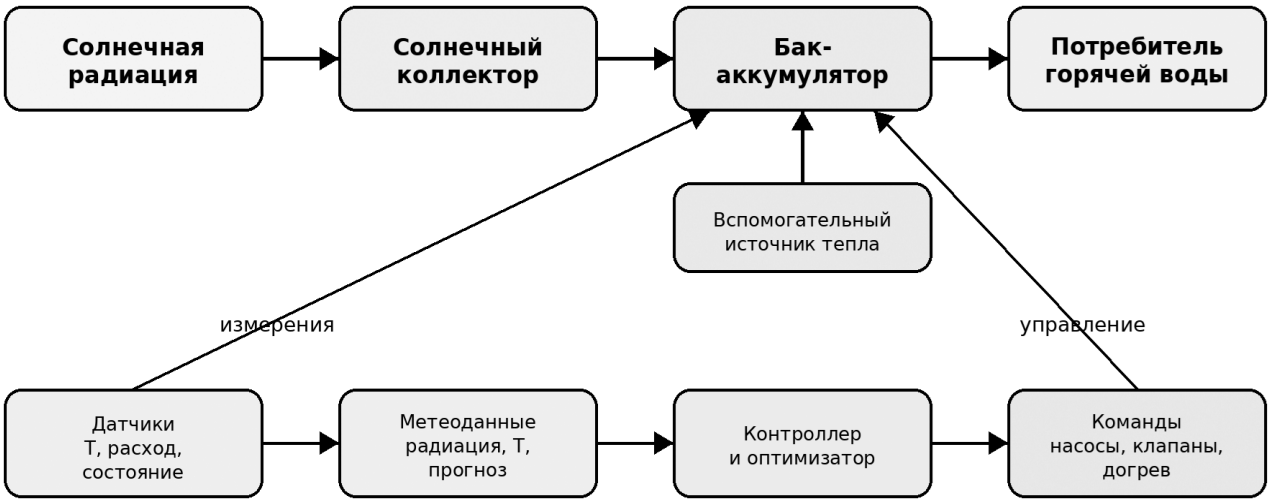


Рис. 1. Структура системы управления солнечного водонагревателя

Научная новизна подхода состоит в совместном использовании эксплуатационных и метеорологических данных, математической модели объекта и алгоритма оптимального управления в рамках единой информационно-измерительной и управляющей системы. Практическая значимость заключается в возможности повышения доли использования солнечной энергии, снижения затрат на догрев воды и уменьшения количества нерациональных переключений оборудования. Тем самым создаются условия для более устойчивой и экономичной эксплуатации гибридных систем нагрева воды в условиях изменяющейся внешней среды и переменного характера водоразбора [2].

Библиографический список

1. Duffie, J. A. Solar Engineering of Thermal Processes / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2013.

2. Performance evaluation of single stand and hybrid solar water heaters : a comprehensive review / Z. Rahimi-Ahar, M. Khiadani, L. Rahimi Ahar, A. Shafieian // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2023. – V. 25. – P. 2157 – 2184.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ PID- И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

И. В. Тюрин, Ф. Саади

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tyrinilja@yandex.ru; firassaadi358@gmail.com)

Повышение энергоэффективности систем горячего водоснабжения зданий относится к числу приоритетных задач современной теплоэнергетики. Существенное влияние на эффективность работы накопительных водонагревателей оказывают случайный водоразбор, колебания температуры входной холодной воды и изменения температуры окружающей среды. В этих условиях особый интерес представляет выбор алгоритма управления, обеспечивающего поддержание требуемой температуры воды при минимальном энергопотреблении [1, 2].

Цель работы состоит в сравнительном исследовании двух подходов к управлению электрической водонагревательной установкой: классического PID-регулирования и адаптивного rule-based алгоритма. Анализ выполнен на основе имитационной модели, разработанной в среде MATLAB/Simulink. Для обеспечения корректности сопоставления оба алгоритма исследовались при одинаковых реализациях внешних возмущений и одинаковом профиле случайного водоразбора.

Динамика установки описывалась уравнением теплового баланса

$$C_{th} \cdot dT/dt = Q_{нагрев} - Q_{потери} - Q_{разбор},$$

где C_{th} – приведенная тепловая емкость системы; T – температура воды в баке; $Q_{нагрев}$ – тепловой поток нагревателя; $Q_{потери}$ – тепловые потери в окружающую среду; $Q_{разбор}$ – эквивалентный тепловой поток, обусловленный потреблением горячей воды [1, 3]. В модели тепловые потери определялись пропорционально разности температур воды в баке и окружающей среды, а величина $Q_{разбор}$ зависела от расхода воды и температуры на входе.

PID-регулятор формировал управляющее воздействие по ошибке регулирования и обеспечивал непрерывное изменение сигнала управления [2]. Адаптивный алгоритм изменял интенсивность нагрева по набору логических правил с учетом температуры в баке, текущего расхода горячей воды и внешних условий. Результаты моделирования представлены на рис. 1. Из графика температуры в баке следует, что оба подхода обеспечивают удержание температуры вблизи заданного значения 55 °C. Вместе с тем адаптивное управление характеризуется меньшей амплитудой отклонений и более плавным поведением в условиях случайных возмущений. График накопленного энергопотребления показывает, что адаптивный алгоритм затрачивает меньше электрической энергии по сравнению с PID-регулятором.

Сводное сопоставление нормированных показателей подтверждает преимущество адаптивного управления по энергетическому критерию, интегральной ошибке IAE и итоговой оценке качества. По показателю комфорта адаптив-

ный алгоритм также демонстрирует более высокий результат. Следовательно, при рассмотренных условиях именно адаптивное rule-based управление обеспечивает более рациональный компромисс между точностью поддержания температуры, комфортом потребителя и энергоэффективностью установки [2, 3].

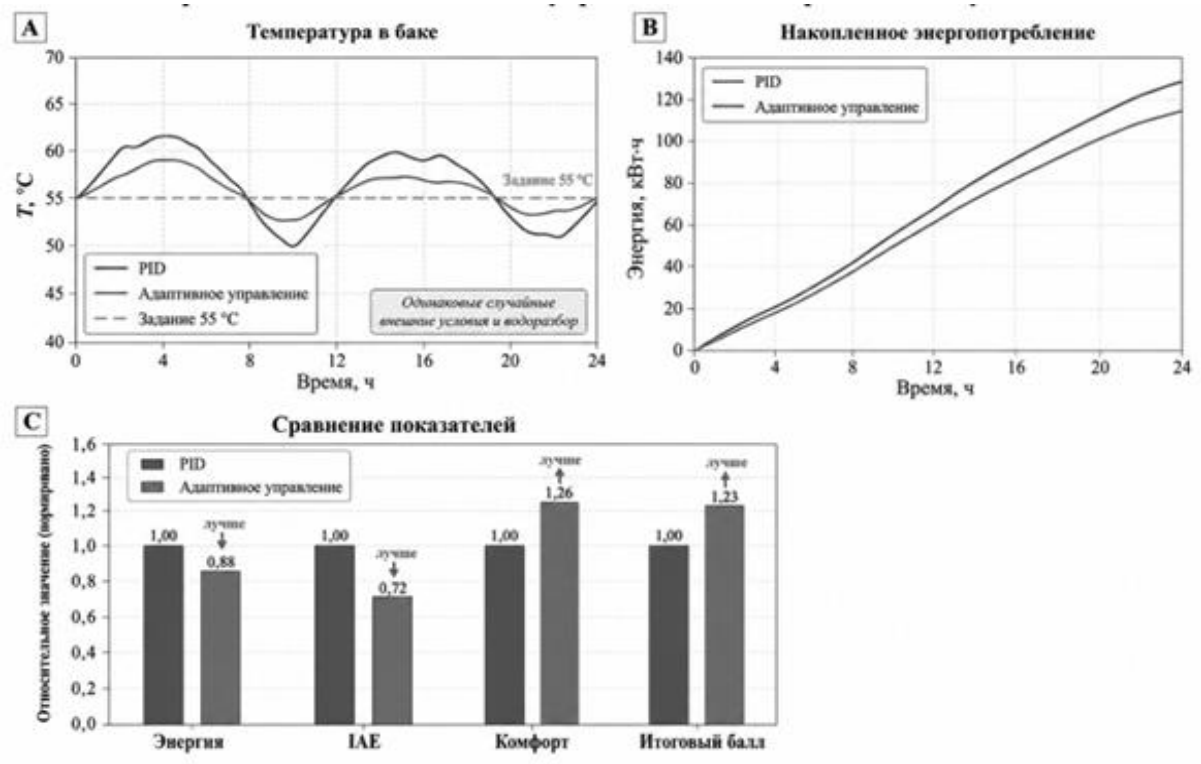


Рис. 1. Результаты моделирования PID- и адаптивного управления

Библиографический список

1. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L.Bergman, A. S. Lavine. – 7th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2011.

2. Åström, K. J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K. J. Åström, T. Hägglund. – 2nd ed. – Research Triangle Park : ISA, 1995.

3. Åström, K. J. Wittenmark B. Adaptive Control / K. J. Åström, B. Wittenmark. – 2nd ed. – Mineola : Dover Publications, 2008.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ГРАЖДАНСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МОБИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Т. У. Умиров, И. П. Медведев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: timuru423@gmail.com; tambov685@yandex.ru)

Гражданские беспилотные летательные аппараты широко используются для мониторинга, съемки и инспекции объектов, однако доступность серийных платформ повышает риск их несанкционированного применения вблизи крити-

чески важных объектов. В этой связи мобильные комплексы электромагнитного подавления рассматриваются как одно из основных средств функционального противодействия, обеспечивающих нарушение работы бортовых радиосистем без механического воздействия на цель [1, 2].

Теоретическая основа подавления заключается в создании на входе приемных трактов БПЛА такой помеховой обстановки, при которой отношение мощности полезного сигнала к мощности помехи снижается ниже порогового уровня устойчивого приема. Для канала управления это приводит к срыву командно-телеметрического обмена, а для навигационного тракта – к ухудшению координатного решения и потере режима удержания позиции [3, 5].

Большинство гражданских БПЛА использует два основных радиоканала: канал управления и канал спутниковой навигации. Канал управления обычно функционирует в распространенных диапазонах ISM, а навигационный тракт основан на приеме сигналов GPS и ГЛОНАСС, которые поступают на вход приемника с очень малой мощностью и потому особенно чувствительны к преднамеренным помехам [1, 2, 5].

Эффективность электромагнитного подавления определяется энергетическим балансом в линии «передатчик помех – приемник БПЛА». В общем виде мощность помехи на входе приемника зависит от мощности передатчика комплекса, коэффициентов усиления антенн и потерь распространения. Следовательно, результативность воздействия возрастает при уменьшении дальности до цели и повышении направленности антенной системы [2, 3].

С практической точки зрения различают подавление канала управления, подавление спутниковой навигации и комбинированное воздействие. Наиболее эффективным считается комбинированный режим, при котором одновременно нарушается внешнее управление и способность автопилота к устойчивому автономному полету [4, 5].

По способу излучения помех мобильные комплексы могут работать во всенаправленном и направленном режимах. Всенаправленное воздействие позволяет быстро сформировать защитную зону вокруг объекта, но требует большей мощности. Направленный режим энергетически выгоднее, так как концентрирует излучение в секторе расположения цели и уменьшает нежелательное влияние на окружающую радиоэлектронную инфраструктуру [2].

Таким образом, теоретические основы электромагнитного подавления гражданских БПЛА мобильными комплексами базируются на положениях теории радиосвязи, теории помех и электромагнитной совместимости [1]. Перспективным направлением развития является адаптивное многодиапазонное воздействие с использованием направленных антенн и с минимизацией побочного влияния на гражданскую инфраструктуру [3, 4].

Библиографический список

1. Белоусов, А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излу-

чением / А. О. Белоусов // Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – 2025. – № 1. – С. 7 – 15.

2. Гладышев, А. Б. Мобильный комплекс радиоэлектронного подавления системы спутниковой навигации беспилотных летательных аппаратов / А. Б. Гладышев, А. Н. Фомин, Д. С. Ермоленко // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 38 – 44.

3. Баранов, А. В. Методы и алгоритмы обнаружения и распознавания беспилотных летательных аппаратов в условиях радиоэлектронного противодействия / А. В. Баранов, А. Н. Костин, О. Ю. Маслов // Радиотехника. – 2024. – № 3. – С. 55 – 62.

4. Ермаков, А. А. Энергетические аспекты построения мобильных комплексов радиоэлектронного подавления БПЛА / А. А. Ермаков, А. Д. Морозов, С. А. Хмельников // Вопросы радиоэлектроники. – 2023. – № 5. – С. 42 – 49.

5. Кирюпин, М. М. Алгоритм управления диаграммообразующим устройством цифровой антенной решетки для систем постановки пространственных барьеров / М. М. Кирюпин, О. А. Белоусов, А. А. Тришаков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 390 – 405.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ БПЛА

Т. У. Умиров, М. А. Фомин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: timuru423@gmail.com; 68.mixxx@mail.ru)

Мобильные комплексы для защиты от несанкционированных беспилотных летательных аппаратов должны обеспечивать быстрое развертывание, обнаружение цели, выбор режима противодействия и минимизацию побочного влияния на собственную радиоэлектронную инфраструктуру [2]. В отличие от стационарных решений, такие системы проектируются с учетом ограничений по массе, габаритам, энергопотреблению и времени готовности к работе [2, 4].

Основой комплекса является согласованная работа нескольких подсистем: радиомониторинга, идентификации, пеленгации, управления помеховым воздействием и энергоснабжения [3]. Для мобильного исполнения особенно важны компактность антенных систем, устойчивость аппаратуры к вибрации и возможность быстрого изменения диаграммы направленности при смене направления угрозы. Гибкое управление лучом достигается применением цифровых антенных решеток с алгоритмическим обеспечением на основе нейросетевых архитектур, что позволяет формировать пространственные барьеры [5, 6].

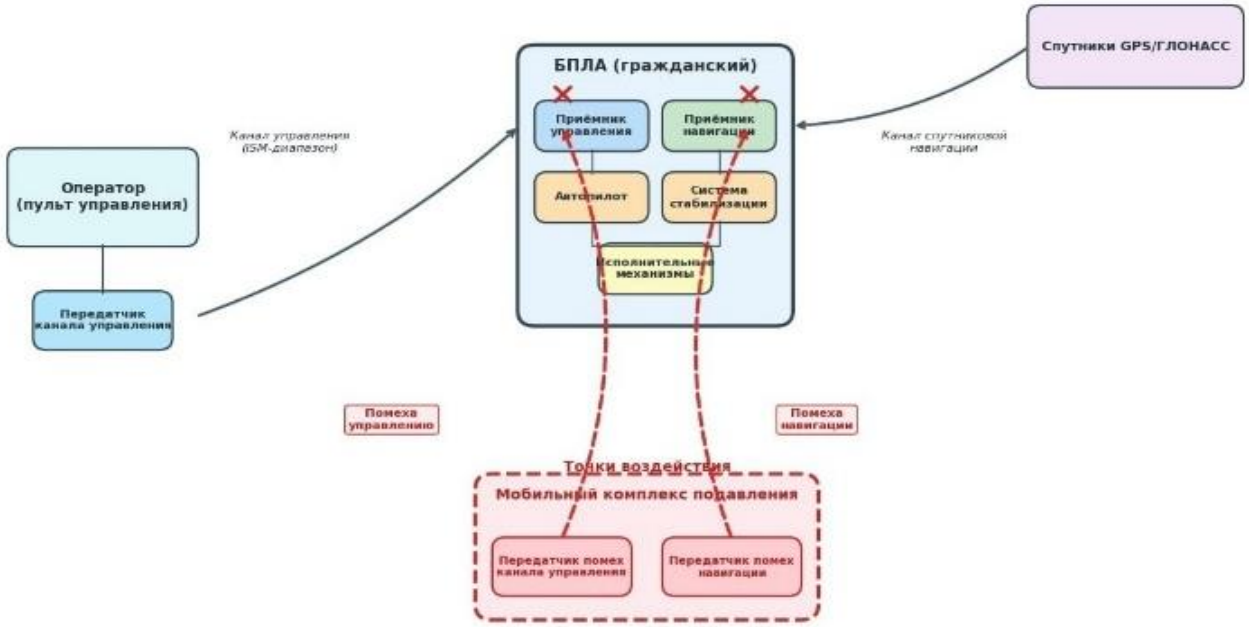


Рис. 1. Структурная схема мобильного комплекса защиты от БПЛА с блоками обнаружения, управления, излучения помех и энергоснабжения

При проектировании комплекса необходимо учитывать рабочие диапазоны наиболее распространенных каналов управления и навигации БПЛА, а также возможность перестройки частоты и применения помехоустойчивых протоколов [2, 3]. Поэтому система должна иметь запас по мощности, средства спектрального анализа и режимы адаптивного воздействия, позволяющие выбирать между заградительным, прицельным и комбинированным подавлением [2].

Существенное требование к мобильным комплексам – электромагнитная совместимость [1]. Избыточное или плохо направленное воздействие может повлиять на собственные средства связи объекта, навигационную аппаратуру и соседние гражданские системы [1]. По этой причине в проект закладывают направленные антенны, ограничение сектора облучения, аппаратные и программные средства контроля уровня излучения [1].

Для мобильного комплекса важен и энергетический баланс. Источник питания должен обеспечивать работу средств обнаружения и подавления в течение требуемого времени, а также сохранение работоспособности при кратковременных пиковых нагрузках [4]. На практике это приводит к необходимости рационального распределения массы между силовой установкой, аккумуляторными батареями, системой охлаждения и радиоэлектронным модулем [4].

Таким образом, особенности проектирования мобильных комплексов защиты от несанкционированных БПЛА определяются сочетанием радиотехнических, энергетических и эксплуатационных требований. Наиболее эффективным является адаптивный комплекс с направленным воздействием, компактной антенной системой, резервом по питанию и возможностью работы в условиях ограниченного времени развертывания [2, 4].

Библиографический список

1. Белоусов, А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением / А. О. Белоусов // Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – 2025. – № 1. – С. 7 – 15.
2. Гладышев, А. Б. Мобильный комплекс радиоэлектронного подавления системы спутниковой навигации беспилотных летательных аппаратов / А. Б. Гладышев, А. Н. Фомин, Д. С. Ермоленко // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 38 – 44.
3. Баранов, А. В. Методы и алгоритмы обнаружения и распознавания беспилотных летательных аппаратов в условиях радиоэлектронного противодействия / А. В. Баранов, А. Н. Костин, О. Ю. Маслов // Радиотехника. – 2024. – № 3. – С. 55 – 62.
4. Ермаков, А. А. Энергетические аспекты построения мобильных комплексов радиоэлектронного подавления БПЛА / А. А. Ермаков, А. Д. Морозов, С. А. Хмельников // Вопросы радиоэлектроники. – 2023. – № 5. – С. 42 – 49.
5. Кирюпин, М. М. Алгоритм управления диаграммообразующим устройством цифровой антенной решетки для систем постановки пространственных барьеров / М. М. Кирюпин, О. А. Белоусов, А. А. Тришаков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 390 – 405.
6. Алгоритмическое обеспечение диаграммообразующего устройства фазированной антенной решетки на основе нейросетевой архитектуры / М. М. Кирюпин, О. А. Белоусов, В. И. Тетюхин и др. // Ползуновский альманах. – 2022. – № 1. – С. 9 – 12.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ХИМИЧЕСКИЕ СОСТАВЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Я. С. Унжаков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: ynzakovyaroslav@gmail.com)

Химические составы можно разделить на пять больших групп: материалы подложек, проводящие составы, диэлектрики и пассивация, фотохимические материалы и технологические жидкости.

Среди подложек самый массовый материал – кремний. Чтобы он стал полупроводником, его легируют фосфором или бором. Это делается высокотемпературной диффузией или ионной имплантацией с последующим отжигом.

Для мощной электроники используют карбид кремния (SiC), для высокочастотной – нитрид галлия (GaN), для оптоэлектроники – арсенид галлия (GaAs) и фосфид индия (InP).

В классической электронике создание проводника – это металлизация напылением или гальваникой. В печатной электронике все чаще используют пасты и чернила, например, серебряная паста (60…80% микронных или субмикронных частиц Ag, органическая связка и растворитель), медная паста, углеродные чернила на основе графена или нанотрубок.

Печатные платы на 99% делаются из FR-4 – это стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой с добавкой антипиренов, диэлектрическая проницаемость около 4,5. Для гибких плат – полиимиды, которые выдерживают до 400 °C. Для высокочастотных применений нужны материалы с низкими потерями: LCP (жидкокристаллические полимеры) и BCB (бензоциклобутен).

Внутри микросхемы есть открытые участки кремния. Самый массовый способ их защиты – пассивация оксидом и нитридом кремния, которые осаждаются из плазмы с моносиланом или дихлорсиланом. Для сложных типографий используют полипараксилилен, который наносится из газовой фазы при комнатной температуре и покрывает любые острые углы и щели идеально конформно. Для корпусов – эпоксидные компаунды с наполнителем из плавленого кварца, который снижает КТР и тепловыделение.

Все дисплеи работают на химии. Жидкие кристаллы – анизотропные молекулы. Главные классы: цианобифенилы, циклогексанкарбоксилаты и эфиры. Ориентация ЖК задается полиимидными слоями, которые механически натирают тканью, что создает угол в несколько градусов, чтобы молекулы встали нужным образом. Цветные фильтры – акрилатные связки с пигментами: фталоцианины (синий и зеленый), хинакридоны (красный), желтые изоиндолиноны. OLED-дисплеи – это уже органическая электроника: малые молекулы или полисопряженные полимеры.

Вместо пайки все чаще используют токопроводящие клеи. Изотропные проводящие клеи – эпоксидная смола + 75…85% серебряных хлопьев (проводимость во всех направлениях), клеят диоды и чипы на гибкие подложки. Анизотропные проводящие клеи – полимерная матрица с 5…15% микросфер из металла, под давлением они сжимаются между контактами и создают соединение только по вертикали. Непроводящие клеи – для склеивания корпусов: эпоксидки с наполнителем, акрилаты УФ-отверждения, силиконовые оптические клеи для склеивания стекол в сенсорах.

Плату во влажной среде спасают конформные покрытия, например акриловые лаки (самые ремонтопригодные: можно паять через них и смывать растворителями), уретановые (очень прочные, но не ремонтируются), поливинилиденфторид (химически стойкий, но дорогой) самоорганизующиеся монослои (для нано-защиты).

Электроника – отрасль с большим экологическим следом. Директива RoHS запретила свинец, кадмий, ртуть, шестивалентный хром, из-за чего пришлось менять припои. Антипирены PBB и PBDE в FR-4 запрещены из-за токсичности диоксинов. Их заменили на безгалогенные системы.

Следующий рубеж – перфторалкильные вещества, включая ПФОС и ПФОК. Они нужны для химической стойкости покрытия, но биоаккумулируются, из-за чего произошел переход на короткоцепные С6-аналоги.

Библиографический список

1. Бахвалова, Ю. В. Химия в электронике: материалы, процессы, технологии / Ю. В. Бахвалова, С. Г. Бахвалов. – М. : Техносфера, 2019. – 480 с.
2. Коллинз, Д. Микроэлектроника: материалы и технология / Д. Коллинз, Р. Фезер ; пер. с англ. А. Н. Кобякова. – М. : Мир, 2018. – 712 с.
3. Химические вещества и материалы в производстве печатных плат : справочник / под ред. Л. П. Калинина. – М. : РадиоСофт, 2020. – 360 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

М. А. Утешев, О. А. Белоусов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: rtkkkk@yandex.ru)

Развитие современных систем связи, радиолокации и радиопротиводействия БПЛА предъявляют повышенные требования к антенным устройствам, их компактности и широкому спектру излучения частот. Антенные решетки лидируют в плане компактности и универсальности применения. Для расширения спектра частот кольцевых антенных решеток применимо использовать сверхширокополосные (СШП) излучатели, тем не менее при использовании данного типа излучателя в составе кольцевой антенной решетки можно столкнуться с рядом особенностей, которые мы и рассмотрим в данной статье.

В современных системах связи и радиолокации, особенно в составе комплексов противодействия БПЛА, критически важна возможность сканирования луча в полусфере и минимизация габаритов антенной системы. В настоящий момент в качестве антенн применяется большое количество излучателей (см., например, [1]), которые подразделяются на фрактальные, биконические, неоднороднощелевые (антенны Вивальди), спиральные, пирамидальные и нерегулярные ТЕМ рупоры. При выборе и интегрировании излучателя в состав кольцевой антенной решетки обращают внимание на изменение диаграммы направленности при изменении частоты, а также взаимного влияния элементов между собой. Из рассмотренных разных типов антенн можно отметить, что рупорные антенны при установке в состав кольцевой антенной решетки будут иметь сильное взаимодействие между собой [1], но применение данного излучателя не позволяет обеспечить возможность сканирования луча в полусфере. Данного недостатка лишены поликонические излучатели [2], однако их конструктивная сложность и габариты могут ограничивать применение в компактных системах.

Наиболее предпочтительными являются излучатели периодические и биконические [3], так как они обеспечивают возможность реализации широкополосных характеристик при относительно простом исполнении. Однако, для достижения максимальной эффективности в составе кольцевой антенной решетки, позволяющей сканировать в полусфере, важным фактором становится компактность излучателя и возможность его близкого расположения к соседним элементам без критического ухудшения характеристик. В этом контексте печатные сверхширокополосные антенны, такие как треугольные, стреловидные или антенны на основе укороченных биконических структур, демонстрируют значительный потенциал.

При проектировании СШП антенных решеток ключевым вопросом становится баланс между компактностью, широкополосностью и минимизацией взаимного влияния. Печатные технологии открывают новые возможности для реализации миниатюрных излучателей с высокой степенью интеграции. Однако с использованием оптимальных конструкций сохраняется проблема изменения диаграммы направленности с частотой, что требует дополнительных методов компенсации (фазового управления). Взаимное влияние элементов решетки может приводить к искажению формы луча, снижению коэффициента усиления и появлению нежелательных боковых лепестков. Для минимизации этих эффектов применяются различные подходы: экранирование, оптимизация расстояния между элементами, использование алгоритмов адаптивного формирования луча. Важно также учитывать, что для задач радиопротиводействия БПЛА требуется не только широкий диапазон частот, но и возможность быстрого электронного сканирования луча, что накладывает дополнительные требования к системе управления фазовращателями.

Таким образом, использование сверхширокополосных печатных излучателей (треугольных, стреловидных, укороченных биконических) в составе кольцевых антенных решеток является наиболее перспективным направлением для современных систем связи, радиолокации и радиопротиводействия БПЛА. Данные решения обеспечивают сочетание компактности, широкополосности и возможности сканирования в полусфере.

Библиографический список

1. Лось, В. Ф. Сверхширокополосные излучатели для антенных решеток / В. Ф. Лось, А. Н. Шаманов // Антенны. – 2004. – Вып. 8-9(87-88). – С. 80 – 87.

2. Исследование фрагмента сверхширокополосной кольцевой антенной решетки для сканирования в полусфере / В. Л. Бирюков, М. Д. Дупленкова, В. И. Калиничев, В. А. Калошин // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 1.

3. Ефимова, Н. А. Сверхширокополосные излучатели для кольцевых антенных решеток / Н. А. Ефимова, В. А. Калошин // Радиолокация и радиосвязь : тр. VI Всерос. научн.-техн. конф. – М., 2012. – Т. 2. – С. 289 – 292.

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

М. А. Утешев, О. А. Белоусов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: rtkkkk@yandex.ru)

Современные радиотехнические системы требуют использования антенных устройств с широким диапазоном частот для обеспечения высокой пропускной способности, надежности связи и точности радиолокационных измерений. Среди них особое место занимают сверхширокополосные (СШП) антенные решетки (АР), которые позволяют работать в диапазоне нескольких десятков и сотен процентов от центральной частоты. Однако их проектирование сталкивается с рядом технических и технологических проблем, связанных с обеспечением стабильных характеристик, минимизацией помех и повышением эффективности. В данной статье мы рассмотрим проблемы и найдем рекомендации для их решения при проектировании сверхширокополосных антенных решеток.

При проектировании СШП АР нужно учитывать особенности СШП излучателей, интегрируемых в АР. Решая задачу надо обращать внимание на несколько аспектов в части, касающейся излучателей, так как элементы имеют кривую АЧХ, что требует применения согласующих устройств, экранирования излучателей и т.д. Несогласованность антенны приводит к потере мощности и к другим нежелательным эффектам. Но при сканировании луча путем численного моделирования цилиндрической антенной решетки можно проектировать без экрана [1]. Рассмотрим современные методы моделирования и оптимизации антенных конструкций, использование новых материалов и технологий изготовления. Среди подходов выделяются применение адаптивных элементов, использование многослойных структур и инновационных материалов, позволяющих минимизировать паразитные эффекты и обеспечить стабильную работу в широком диапазоне частот [2]. Важно отметить, что внедрение методов численного моделирования и экспериментальных исследований [3] существенно повышает точность разработки и способствует созданию эффективных решений. Обсуждение показало, что комбинирование различных методов и технологий позволяет существенно повысить характеристики сверхширокополосных антенных решеток и снизить уровень их недостатков.

Таким образом, успешное проектирование сверхширокополосных антенных решеток требует комплексного учета особенностей излучателей, их согласования и технологических аспектов. Использование современных методов численного моделирования, инновационных материалов и технологий изготовления позволяет значительно повысить стабильность и эффективность работы таких систем в широком диапазоне частот. Комбинирование различных подходов и методов оптимизации способствует снижению нежелательных эффектов, повышению характеристик антенных решеток и решению основных технологических проблем, что делает их перспективными для применения в современных радиотехнических системах.

Библиографический список

1. Дупленкова, М. Д. Сверхширокополосная цилиндрическая антенная решетка на основе поликонических излучателей / М. Д. Дупленкова, В. И. Калиничев, В. А. Калошин // Журнал Радиоэлектроники. – 2015. – № 11. – URL : http://jre.cplire.ru/jre/nov15/13/text.pdf

2. Нгуен К. З. Анализ и оптимизация сверхширокополосных малоэлементных решеток линейной поляризацией с целью расширения полосы частот : дис. … канд. физ-мат. наук. – М., МФТИ, 2017.

3. Кизименко, В. В. Численное моделирование многолучевых микрополосковых антенных решеток для радиоэлектронных систем / В. В. Кизименко, С. А. Кореневский, Н. М. Наумович // Новые горизонты – 2019 : сб. материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, Минск, 12–13 ноября 2019 г. ; Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 118 – 120.

РАЗРАБОТКА МНЕМОСХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ БИООТХОДОВ

А. А. Уютнов, А. Н. Грибков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: aleksuyutnov@yandex.ru)

Гидротермальная карбонизация (ГТК) является перспективным способом ресурсосберегающей переработки биоотходов в биоуголь без предварительной сушки. В процессе ГТК необходимо поддержание равномерного тепломассообмена в зоне реакции. Поэтому задача создания эффективной системы управления и мониторинга технологического процесса ГТК является весьма актуальной.

Одним из ключевых элементов современной системы управления технологическим процессом является мнемосхема. Она обеспечивает возможность одновременного контроля множества режимных параметров технологического процесса (температуры, давления, расхода и др.).

В качестве объекта управления рассматривается установка ГТК биоотходов в кипящем слое в среде перегретого водяного пара [1]. Для данной установки в среде Trace Mode 7 [2] был разработан специализированный экран системы управления и мониторинга, состоящий из мнемосхемы технологического процесса, с возможностью интеграции параметров реального времени, средств регулирования, сигнализации и архивации данных.

Мнемосхема, представленная на рис. 1, содержит бункер исходной биомассы с шнековым питателем, парогенератор, пароперегреватель, реактор ГТК с электрообогреваемой рубашкой, циклон со сборником частиц мелкодисперсного мусора, бункер готового биоугля, конденсатор и емкость сбора конденса-

та. Каждый элемент схемы связан с тегами ввода-вывода и может отображать актуальные для технологического процесса значения переменных.

Бункер исходной биомассы и реактор гидротермальной карбонизации снабжены шкалами измерения температуры. В бункере исходной биомассы с помощью шкалы отслеживается изменение температуры стенок для предотвращения образования конденсата при значениях температуры ниже 100 °С [1]. В реакторе ГТК шкала позволяет оценивать температуру протекания реакции.

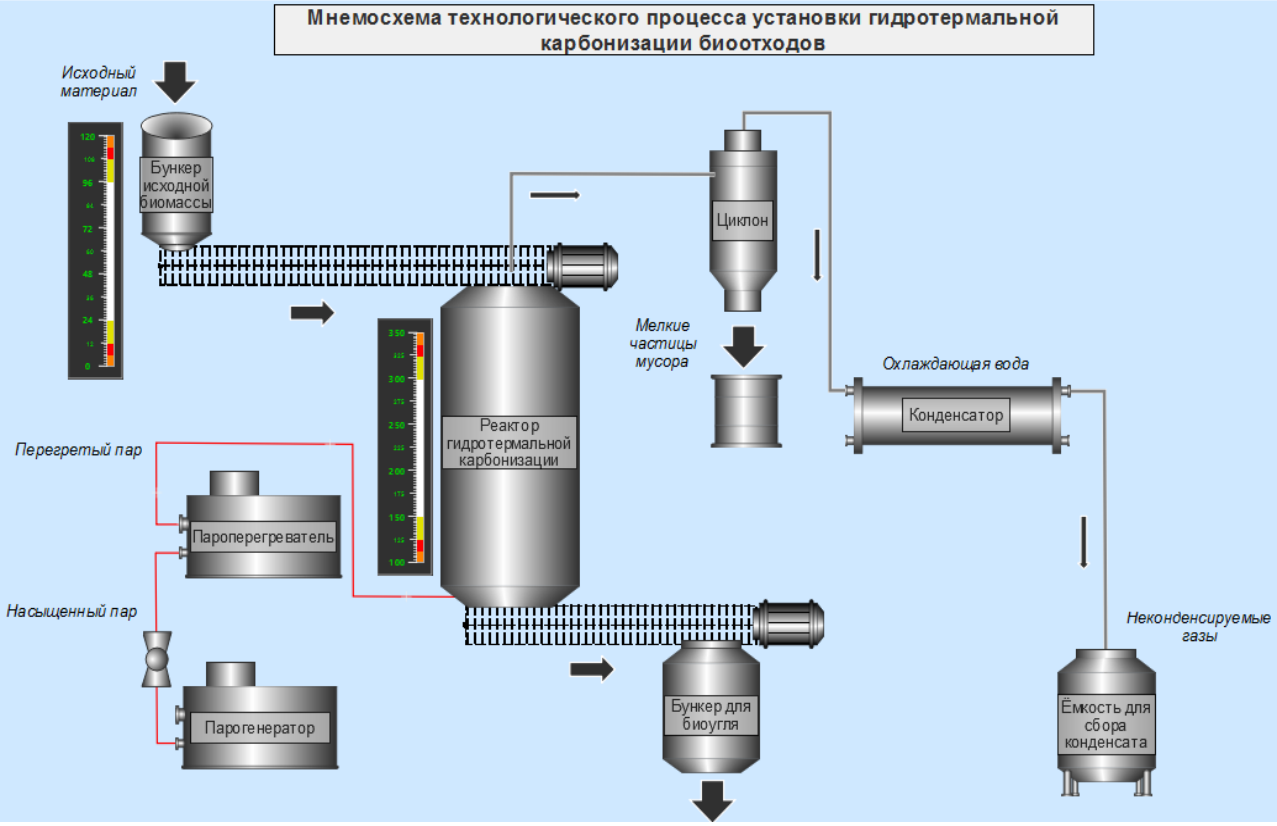


Рис. 1. Экран системы управления и мониторинга технологического процесса ГТК биоотходов

Мнемосхема разработана с использованием стандартных библиотек SCADA-системы Trace Mode 7 и обеспечивает наглядное графическое отображение технологического процесса ГТК биоотходов. Дальнейшее развитие функциональности мнемосхемы позволит обеспечить не только мониторинг технологических параметров установки ГТК биоотходов в режиме реального времени, но и осуществлять оптимальное управление режимами работы технологического оборудования.

Библиографический список

1. Муратова, Н. С. Гидротермальная карбонизация биоотходов в кипящем слое в среде перегретого водяного пара : дис. … канд. техн. наук: 05.17.08 / Н. С. Муратова. – Тамбов, 2021. – 209 с.

2. SCADA TRACE MODE: [сайт]. – М., 2026. – URL : https://tracemode.ru (дата обращения: 30.04.2026).

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ В КЛАССИФИКАЦИИ И ПОДАВЛЕНИИ ДРОНОВ

М. А. Фомин, С. К. Казьмин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: 68.mixxx@gmail.com; serz.kamin@gmail.com)

Проблема обнаружения и подавления беспилотных летательных аппаратов в последние годы приобрела всеобъемлющий характер. Гражданские беспилотники используются во многих задачах, но их массовое распространение создает риски для охраняемых территорий и воздушного пространства. Главная сложность в том, что беспилотный аппарат – объект малый, быстро движущийся и часто плохо различимый на фоне городской или природной среды. Без интеллектуальной обработки система быстро сталкивается с ложными срабатываниями, пропусками и зависимостью от условий наблюдения.

Именно здесь важную роль играют сверточные нейронные сети. Они умеют автоматически выделять признаки изображения или сигнала и использовать их для различения объектов. В исследованиях по обнаружению беспилотников нейронные сети показывают хорошие результаты как при зрительном распознавании, так и при анализе радиосигналов и их частотных диаграмм. В ряде работ сверточные модели сохраняют устойчивость даже при низком уровне полезного сигнала и в условиях помех, что делает их перспективными для полевого применения.

Определение типа БАС – первый и важнейший этап всей цепочки. Если система не может надежно отличить беспилотник от птицы или иного объекта, последующие действия теряют смысл. В одном из исследований признаки, выделенные с помощью нейронной сети, обеспечили высокие показатели: искусственная нейронная сеть достигла 89,9% правильных ответов, метод ближайших соседей – 85%, а метод случайных решающих деревьев – также 85%. Это говорит о том, что нейронные сети могут выступать не только как конечный распознаватель, но и как мощный инструмент извлечения признаков для дальнейшей обработки. Для практики важна не только точность, но и устойчивость модели к разнообразию обстановки. В одном исследовании по видеопотоковому обнаружению были созданы модели полносвязных и сверточных сетей, обученные на изображениях беспилотников, листвы, травы, облаков и насекомых. Сравнение показало преимущество сверточных сетей при распознавании подвижных объектов – именно тех, которые обычно создают наибольшие трудности.

В работах по радиочастотному распознаванию беспилотников нейронные сети также дают высокие результаты. На основе частотных диаграмм модели достигали средней сбалансированной точности выше 85% при низком отношении сигнала к шуму, а в испытаниях в реальных условиях – более 80%. Это важно, потому что реальная среда редко бывает благоприятной: сигнал искажается, условия распространения постоянно меняются.

Говоря о подавлении, важно понимать: сама нейросеть не выполняет физическое воздействие. Ее задача – обеспечить информационную основу для принятия решения. Если распознавание выполнено точно, система может перейти к противодействию: сопровождению, блокировке канала управления, оценке траектории. Качество подавления напрямую начинается с качества распознавания. При этом нельзя считать систему эффективной, если она хорошо распознает беспилотники, но работает с заметной задержкой. Реальные противобеспилотные устройства оценивают не только по точности, но и по времени обработки, задержке вывода и устойчивости к помехам.

Сверточные сети не являются универсальным решением. Их эффективность зависит от качества обучающей выборки, архитектуры и особенностей сцены. Если модель видела слишком мало типов беспилотников, она теряет устойчивость при переносе в реальную среду. Кроме того, в задачах подавления высока цена ложного срабатывания: если система принимает за беспилотник птицу, это ведет к ненужным действиям; если пропускает настоящий аппарат – риск еще выше. Нужен тонкий баланс между чувствительностью и избирательностью.

Перспективная линия развития – сочетание нейронных сетей с другими методами машинного обучения. В ряде исследований признаки, выделенные сверточной сетью, передавались в искусственную нейронную сеть, метод ближайших соседей или метод случайных деревьев, что улучшало итоговое распознавание. Также перспективны гибридные архитектуры, объединяющие сверточные сети с рекуррентными блоками, механизмами выбора внимания и моделями предсказания пути движения. Система должна не только понять, что перед ней беспилотник, но и оценить, куда он движется и как быстро меняет положение. Это позволяет перейти от простого обнаружения к интеллектуальному подавлению.

Практическая ценность нейронных сетей определяется не только точностью, но и общей пригодностью к реальному применению. Если модель уверенно работает на тестовых данных, но слабо переносится в реальную среду, ее значение ограничено. Для оператора или автоматизированной платформы важны три вещи: быстрое обнаружение, правильное распознавание и своевременный переход к действию. Сверточные нейронные сети закрывают первые две задачи, а за счет этого улучшают и третью.

Вывод из всего вышесказанного: они успешно выделяют признаки, распознают беспилотники среди других объектов, работают с видеопотоками и сохраняют приемлемую точность в условиях помех. Их применение особенно ценно там, где требуется высокая скорость реакции и минимизация ошибок. Эффективность нейронных сетей определяется совокупностью факторов: точностью, устойчивостью, скоростью и способностью к обобщению. Именно поэтому они остаются одним из центральных инструментов в системах противодействия беспилотным летательным аппаратам.

Библиографический список

1. Белоусов, А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением / А. О. Белоусов // Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – 2025. – № 1. – С. 7 – 15.
2. Небаба, С. Г. Сверточные нейронные сети семейства YOLO для мобильных систем компьютерного зрения / С. Г. Небаба, Н. Г. Марков // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 615 – 631.
3. Афанасьева, Ж. С. Распознавание объектов с помощью сверточных нейронных сетей : учебное пособие / Ж. С. Афанасьева, А. Д. Афанасьев. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2023. – 134 с.
4. Литвиненко, В. И. Беспилотники: разведка, тактика действий, поражение : учебное пособие / В. И. Литвиненко. – М. : РУСАЙНС, 2025. – 191 с.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ ПРЕДИКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ГРАЖДАНСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

М. А. Фомин, Т. У. Умиров

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: 68.mixxx@gmail.com; timuru423@gmail.com)

В последние годы противодействие гражданским беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) приобрело ярко выраженный прикладной характер. Наряду с мирным использованием (съемка, мониторинг, логистика) массовое распространение дронов создает серьезные риски для охраняемых территорий. Задача не сводится к простому обнаружению летящего объекта: система должна отличить БПЛА от птицы, блика или элемента застройки, оценить траекторию и характер движения. Именно поэтому возрастает значение интеллектуальных методов анализа.

Сверточные нейронные сети (CNN) особенно полезны, так как автоматически извлекают визуальные признаки из изображений без ручного задания фильтров. В российских разработках CNN уже применяются для автоматизации оптического обнаружения БПЛА, их классификации и оповещения оператора. Исследования показывают, что сети способны также оценивать параметры движения (скорость, ускорение), что критически важно для прогнозирования.

Системы предиктивного подавления должны решать несколько взаимосвязанных задач:

1. Своевременно обнаружить БПЛА.
2. Определить его тип, отличив от других объектов.
3. Оценить вероятную траекторию и подготовить сценарий реагирования.

Сбой или неверный просчет на любом этапе снижает эффективность всей системы в целом. Традиционные методы наблюдения особенно слабы в городской среде из-за малых размеров дронов, их маневренности и изменчивости условий видимости. Поэтому на первый план выходит машинное обучение. Предиктивный подход означает, что система не просто фиксирует факт появления, а пытается опередить ситуацию.

Сверточные нейронные сети давно доказали свою эффективность в компьютерном зрении. Их достоинство – выделение признаков разной сложности, что важно при изменении ракурса, освещения и фона. Для практического применения требуется разнообразная обучающая выборка, иначе модель дает сбои в реальных условиях. Отечественные работы показывают, что глубокие сети успешно классифицируют малые и крупные мультироторные БПЛА. Кроме того, CNN могут использоваться не только как классификатор, но и как инструмент извлечения признаков для последующего прогнозирования, что удобно в гибридных системах противодействия. В различных источниках подчеркивается, что нейросетевые решения уже встроены в комплексы подавления БПЛА на основе ИИ. Например, созданы системы, способные видеть дроны, соблюдающие радиомолчание (при дооснащении радаром), а также комплексы, сочетающие лазер, РЭБ и механические средства поражения – нейросетевой блок здесь отвечает за обнаружение и сопровождение.

Эффективность CNN определяется точностью распознавания, скоростью обработки видеопотока, устойчивостью к шуму, помехам и изменению освещения, а также пригодностью к работе в реальном времени. Особенно важен параметр ложных срабатываний: ошибка классификации может привести к ненужному реагированию. Поэтому систему оценивают по совокупности характеристик (точность, полнота, время реакции), а не по одному числу.

Ближайшие перспективы – более тесная интеграция визуального анализа, радиолокации и моделей прогнозирования движения, а также адаптация моделей к новым условиям без полного переобучения (дообучение, синтетическая генерация данных). Важно и облегчение архитектур сетей для работы на компактных вычислителях. Одновременно растут требования к прозрачности и управляемости систем.

Подводя итог можно сказать: машинное обучение на основе сверточных нейронных сетей занимает центральное место в системах предиктивного подавления гражданских БПЛА. Российские исследования подтверждают, что CNN способны успешно решать задачи обнаружения, классификации, сопровождения и поддержки принятия решений. Их практическая ценность определяется не только точностью, но и способностью работать в реальном времени в сложной среде, обеспечивая переход от простого наблюдения к интеллектуальному опережающему реагированию.

Библиографический список

1. Белоусов, А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением / А. О. Белоусов // Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – 2025. – № 1. – С. 7 – 15.
2. Соробин, А. Б. Сверточные нейронные сети: примеры реализаций : учебно-методическое пособие / А. Б. Соробин, Л. М. Железняк, Е. А. Зикеева. – М. : РТУ МИРЭА, 2020. – 159 с.
3. Макаренко, С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам : монография / С. И. Макаренко. – СПб. : Наукоемкие технологии, 2020. – 204 с.
4. Литвиненко, В. И. Беспилотники: разведка, тактика действий, поражение : учебное пособие / В. И. Литвиненко. – М. : РУСАЙНС, 2025. – 191 с.
5. Добридень, В. И. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты и средства борьбы с ними ведущих зарубежных производителей : монография / В. И. Добридень, А. С. Уланов ; под ред. чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. П. А. Созинова. – М. : Наш мир, 2024. – 253 с.
6. Цехановский, В. В. Искусственные нейронные сети : учебник / В. В. Цехановский, Е. Ю. Бутырский. – М., 2024.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

П. П. Фролов, И. А. Попов, А. А. Подать

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tstu@tstu.ru)

Введение: *актуальность проблемы*

1. Кризис традиционной навигации: гражданские БПЛА (дроны-курьеры, агродроны, такси) не могут полагаться исключительно на GNSS (GPS/ГЛОНАСС) из-за городских «каньонов», помех, спуфинга (ложных сигналов) и зон радиомолчания.
2. Определение ИИ в навигации: использование методов машинного обучения (нейросетей, обучения с подкреплением, компьютерного зрения) для обработки сенсорных данных (камер, лидаров, инерциальных датчиков) без жестко заданных алгоритмов.
3. Специфика гражданского сектора: требования к безопасности (SIL), энергоэффективности, стоимости компонентов и работе в непредсказуемой среде (люди, животные, погода).

Архитектура и функции ИИ-навигации

1. Гибридная навигация на основе ИИ:** ИИ выступает не как замена, а как «умный фильтр» для слияния данных (Sensor Fusion). Нейросеть динамически пересчитывает веса датчиков (отключает GPS при аномалии, доверяет оптическому потоку).

2. V-SLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping):** глубокие нейросети (Deep SLAM) позволяют дрону строить карту местности в реальном времени по видеопотоку, даже при отсутствии текстур (белая стена) или при динамическом освещении.

3. Предсказание траектории (Deep Learning for Prediction):** ИИ анализирует историю движения других объектов (автомобили, пешеходы) и предсказывает их траекторию на 3…5 с вперед (LSTM-сети, трансформеры), что критично для обгона и уклонения.

4. Визуальная одометрия без GPS: использование сверточных нейросетей (CNN) для оценки перемещения дрона по смене кадров камеры, что позволяет летать внутри зданий, мостов и тоннелей.

Практические задачи и ограничения

1. Адаптация к погоде и времени суток: ИИ, обученный на данных с тепловизоров и радаров, обеспечивает навигацию в тумане, дожде и ночью, где лазерные дальномеры (лидары) теряют эффективность.

2. Снижение вычислительной нагрузки: применение методов TinyML (облегченные нейросети) и нейроморфных процессоров позволяет реализовать сложную навигацию на одноплатниках уровня Raspberry Pi или Jetson Nano, что снижает энергопотребление и массу дрона.

3. Обучение без учителя (Self-supervised learning): дрон может обучаться на своих собственных ошибках (например, застревание в ветках, удар о провода) в симуляторах (AirSim, Gazebo), что ускоряет адаптацию к новым ландшафтам без участия человека.

Выводы и перспективы

1. Текущие ограничения:

Black Box problem: Сложно сертифицировать ИИ для гражданской авиации (регуляторы FAA/EASA не доверяют «необъяснимым» решениям).

Атаки на ИИ: специфический шум на камере (adversarial patch) может заставить дрон игнорировать препятствие.

2. Прорывные направления:

ИИ для коллективной навигации (рой дронов обменивается картами без участия базовой станции).

Использование фундаментальных моделей (Foundation Models) – один ИИ понимает физику мира (снег, дым, вода) без дообучения.

3. Итоговый тезис: К 2028 – 2030 годам ИИ станет обязательным компонентом системы навигации любого гражданского БПЛА категории BVLOS (за пределами прямой видимости), превратив дрон из радиоигрушки в автономную систему, способную принимать решения в условиях неопределенности.

Библиографический список

1. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М. : Радиотехника, 2018. – 456 с.

2. Иванов, А. В. Применение искусственного интеллекта в навигационных системах БПЛА / А. В. Иванов, С. П. Петров // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 45 – 58.

3. Королев, В. Ю. Адаптивные алгоритмы фильтрации в гибридных навигационных системах / В. Ю. Королев // Информационные технологии в управлении. – 2020. – № 4. – С. 12 – 25.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ РАДИОНАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ (БВС) СТРАТЕГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

П. П. Фролов, И. А. Попов, А. А. Подать

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tstu@tstu.ru)

Введение: Особенности стратегической радионавигации

1. Главное отличие от гражданской сферы: целенаправленное радиопротиводействие (спуфинг, шумовые постановки, подмена эфемерид, атаки на синхронизацию). БВС стратегического назначения должно выполнить задачу даже при полной утрате GNSS и радиосвязи с базой.

2. Неприменимость стандартных решений: фильтры Калмана и «жесткие» алгоритмы срываются при нестационарных параметрах помех. ИИ здесь выступает средством когнитивной радионавигации – способности распознавать тип атаки и перестраивать работу приемника за доли секунды.

3. Двойственная роль радиосигнала: в стратегических БВС радиосигнал может либо отсутствовать (режим радиомолчания), либо быть опасным (троянский GNSS). ИИ учится различать «полезный шум» (радиоизлучение объектов противника) и «ядовитый сигнал» (подмена).

ИИ против спуфинга и глушения

1. Обнаружение структурных аномалий сигнала: глубокие нейросети (1D-CNN + LSTM) анализируют не только корреляционный пик, но и форму фронта, фазовые шумы и микро-доплеровские эффекты. Обнаруживают ретранслированный (meaconing) сигнал с задержкой менее 10 нс, что недоступно обычным приемникам.

2. Иммунный «слепой» режим: если ИИ классифицирует сигнал как поддельный (доверие < 0,3), он отправляет команду:

Обесточить GNSS-модуль (физическая защита от перенапряжения через ложный сигнал).

Перейти на пассивную радионавигацию – только прием сигналов маяков, РЛС ПВО или сотовой инфраструктуры противника с последующим триангуляционным расчетом координат (нейросетевой пеленгатор).

3. Адаптивная фильтрация с помощью RL (обучение с подкреплением): Агент (ИИ) пробует разные режимы работы радиотракта (полоса пропускания, время накопления, порог детектирования) и получает «награду» за устойчивость позиционирования. Через 5…10 с боя вырабатывается защитная тактика под конкретный тип РЭБ-станции противника.

Навигация при отсутствии полезных радиосигналов

1. Использование радиоизлучений противника как навигационного маяка (случайный сигнал):

ИИ оцифровывает шумы от РЛС дальнего обнаружения, радиорелейных линий, помех от систем РЭБ самого противника.

Каждая такая станция – «радиозвезда» с известными координатами (если они добыты разведкой). ИИ выполняет виртуальную псевдодальномерную обработку этих сигналов, получая координаты с ошибкой до 100…300 м – достаточно для выхода в район цели без GPS.

2. Динамическая карта радиочастот (Cognitive Radio Map):

Стратегический БВС запоминает структуру электромагнитного поля по пути (мощность, частоту, поляризацию). При возврате или повторном заходе ИИ сличает текущий «радиоотпечаток» с картой и вычисляет местоположение даже при выключенном GNSS.

Технология: Сиамские нейросети (Siamese Networks) для сравнения карт.

3. Иммунитет к когнитивным атакам: Противник может подстраивать помехи под ожидания алгоритма (adversarial ML). В стратегических БВС применяют ансамбли разнородных нейросетей (ResNet + Transformer + LSTM) и стохастическое переключение между ними, чтобы атакующий не мог адаптироваться.

Системные ограничения и перспективы

Ограничения:

1. Требует значительной вычислительной мощности на борту (нейропроцессоры типа Intel Loihi 2, «Малыш» или аналоги) – до 10…15 Вт в пике, что критично для средних БВС.

Необходима предварительная разведка радиообстановки в зоне операции (наземные датчики или LRE-модули).

2. Ключевое преимущество: стратегический БВС с ИИ-радионавигацией может действовать в условиях полного радиоподавления не как инерциальная «болванка» с дрейфом 1 км/ч, а как реконфигурируемый интеллектуальный радиопеленгатор, обращающий сигналы самого противника себе на пользу.

3. Итоговый тезис: искусственный интеллект в радионавигации стратегических БВС трансформирует концепцию «безопасной связи» в концепцию «боеспособной навигации». Вместо поиска чистого GNSS-сигнала ИИ учится выживать и наводиться в радиочастотной войне, где каждый враждебный сигнал становится потенциальным навигационным ориентиром.

Библиографический список

1. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М. : Радиотехника, 2018. – 456 с.

2. Иванов, А. В. Применение искусственного интеллекта в навигационных системах БПЛА / А. В. Иванов, С. П. Петров // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 45 – 58.

3. Королев, В. Ю. Адаптивные алгоритмы фильтрации в гибридных навигационных системах / В. Ю. Королев // Информационные технологии в управлении. – 2020. – № 4. – С. 12 – 25.

МНОГОЧАСТОТНЫЙ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

П. А. Цих, А. Г. Приставка

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: tcikh.pa@dvfu.ru; pristavka.ag@dvfu.ru)

Передача изображений в гидроакустическом канале усложняется из-за ограниченной полосы пропускания, многолучевости, реверберации, временной нестационарности и доплеровских искажений [1, 2]. Таким образом, при разработке приемопередатчика важным является не только скорость, но и устойчивость к ошибкам.

Цель работы – разработка и программная реализация экспериментального приемопередатчика изображений для гидроакустического канала связи. В работе была использована многочастотная модуляция в полосе 4…8 кГц, служебный заголовок, код Хэмминга (7,4) и блочный интерливинг. В качестве объекта исследования используется изображение, которое изменяется по размеру до 64×64 и переводится в полутоновый формат, далее преобразуется в битовый поток. Заголовок пакета повторяется и кодируется, полезная нагрузка кодируется и подвергается интерливингу для снижения пакетных ошибок [3].

Частотная сетка формируется с шагом Δf (Δf – интервал между соседними поднесущими). Длительность символа полезной части определяется (1):

$$T_s = \frac{1}{\Delta f}, \tag{1}$$

где T_s – длительность полезной части символа, с; Δf – частотный шаг, Гц.

Защитный интервал вводится для уменьшения многолучевости. На приемнике выполняется полосовая фильтрация, корреляционный поиск по преамбуле, некогерентная демодуляция, majority vote по заголовку, декодирование Хэмминга и деинтерливинг. Качество работы системы оценивается по битовой вероятности ошибки *BER*, вычисляемой по формуле (2):

$$BER = \frac{N_{err}}{N_{bits}}, \quad (2)$$

где N_{err} – число ошибочных принятых битов; N_{bits} – общее число переданных битов.

В среде MATLAB был реализован приемопередатчик и проведены эксперименты в режиме цифрового моделирования и в условиях реального акустического тракта (в аквариуме и бассейне). Данное исследование позволило оценить влияние отражений, реверберации и многолучевости на качество приема. Результаты отобразим в рис. 1 и табл. 1.



Рис. 1. Пример восстановленного изображения после передачи

1. Показатели *BER*

BER	Значение
До декодирования	3,38%
Полезная нагрузка после Hamming	0,79%
Заголовок	0%

Полученные результаты показывают, что разработанная система может рассматриваться как экспериментальный приемопередатчик изображений для гидроакустического канала. В дальнейшем планируется развитие с использованием более мощных помехоустойчивых кодов, компенсацией доплеровских искажений и адаптацией параметров передачи к текущему состоянию канала [4].

Библиографический список

1. Stojanovic, M. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization / M. Stojanovic, J. Preisig // IEEE Communications Magazine. – 2009. – V. 47, No. 1. – P. 84 – 89.

2. A survey on physical layer techniques and challenges in underwater communication systems / N. U. R. Junejo, M. Sattar, S. Adnan, et al. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – V. 11, No. 4. – Art. 885.

3. Advances and trends in channel codes for underwater acoustic communications / Y. Zhao, S. Hao, F. Tong, et al. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – V. 11, No. 12. – Art. 2323.

4. Adaptive OFDM modulation for underwater acoustic communications: Design considerations and experimental results / A. Radosevic, R. Ahmed, T. M. Duman, et al. // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2014. – V. 39, No. 2. – P. 357 – 370.

ПОСТРОЕНИЕ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ДВОЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ДЛЯ РАДАРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

П. В. Чернов, Ю. С. Неплюева, И. С. Косырев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: pavel.chernov.2003@mail.ru)

В последнее время необходимость построения систем обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов в стране возрастает с каждым днем. Учитывая международную обстановку, повышающийся уровень технологического развития построения дронов и их общую дешевизну, данные аппараты несут в себе серьезную угрозу, основная из которых – массовость, за счет которой отследить все цели становится трудно, особенно ввиду размеров Российской Федерации. Для решения данной проблемы имеется острая необходимость создания и развития дешевых и эффективных систем обнаружения БПЛА.

Основным ориентиром при построении комплексов обнаружения беспилотных авиационных средств, является возможность обнаружения и сопровождения целей с малой радиозаметностью. Ввиду перечисленных выше факторов и возможности БПЛА к резкому маневрированию, традиционные методы селекции движущихся целей резко теряют в своей эффективности. Использование двойной поляризации в антенной решетке достаточно эффективно помогает сгладить данную проблему за счет учета поляризационного энергетического согласования, суть которого заключается в том, что отраженный от цели сигнал в двух плоскостях демонстрирует определенную корреляцию и когерентность [1].

Конструктивно, при использовании микрополосковых излучателей, антенные решетки состоят из четырех перемежающиеся решеток, в которых одна половина отвечает за горизонтальную плоскость поляризации, а вторая – за вертикальную.

Применение двухполяризационной радиолокационной техники обеспечивает количественно оцениваемые преимущества. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при отношении сигнал/шум свыше 5 дБ вероятность обнаружения маневрирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) от равномерного полета до резких изменений ускорения превышает 80%.

Кроме того, поляриметрический подход существенно сокращает вычислительную сложность обработки сигналов. В испытаниях с реальными данными от стационарных и вращающихся платформ БПЛА алгоритмы, интегрирующие поляризационные ограничения, демонстрировали ускорение работы в десятки раз по сравнению с традиционными детекторами постоянной вероятности ложной тревоги, которые требуют отдельного анализа шумовых компонент в каждом канале. Ускорение достигается за счет отсева ложных траекторий, не удовлетворяющих критериям поляризационного согласования.

С инженерной перспективы формирование компактных двухполяризационных решеток для радаров с синтезированной апертурой (РСА) представляет собой сложную задачу. Разработчики стремятся к балансу между электрическими и массогабаритными характеристиками [2].

В заключение стоит сказать, что двухполяризационная технология в антенных решетках переводит системы обнаружения БПЛА на качественно новый уровень: от бинарной задачи детекции точечных целей к задаче распознавания объектов по поляризационной сигнатуре в реальном времени, что особенно важно с учетом геополитической обстановки в данный момент.

Библиографический список

1. Анализ функционирования систем автоматического обнаружения на основе анализа характера помех от беспилотных летательных аппаратов / М. М. Кирюпин, О. А. Белоусов, В. В. Носков, А. А. Мамедов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. Восьмой Всерос. молодежной науч. конф. – 2023. – С. 184–185.

2. Применение многослойных сверхточных нейронных сетей при идентификации объектов на радиолографических изображениях комплекса обнаружения малых БАС / А. О. Смирнов, О. А. Белоусов, А. А. Тришаков, М. М. Кирюпин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2023. – С. 199 – 202.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ИСПРАВНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, П. И. Карелин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: dekan_chti@mail.ru, art_mari@bk.ru, pavel.karelin.74@yandex.ru)

Развитие техники и технологий приводят к усложнению технических средств, повышению требований к качеству измерительных экспериментов, проводимых в целях контроля состояния таких объектов. Определение пара-

метров и оценка работы сложных объектов проводится с применением соответствующих современных электронных измерительных средств (ЭИС), удовлетворяющих требованиям по быстродействию и точности, а, в конечном итоге, позволяющим получать достоверную информацию о состоянии контролируемых параметров исследуемого технического объекта. Среди таких ЭИС особо значимыми, отличающимися разнообразием выполняемых функций являются информационно-измерительные системы (ИИС).

Важную характеристику качества ИИС представляет метрологическая надежность (МН), определяемая свойством ИИС сохранять нормируемые метрологические характеристики в пределах установленных норм на всех этапах «жизни» ИИС, т.е. гарантированно обеспечивать уровень метрологической исправности ИИС, соответствие метрологических характеристик установленным требованиям при проектировании и поддерживать его на этапе эксплуатации. При этом, как известно, метрологическая исправность (МИ) и МН ИИС в целом определяется метрологической исправностью блоков, составляющих измерительный канал ИИС.

Сведения об МН ИИС необходимы для правильной организации метрологического обслуживания ИИС и назначения сроков очередной поверки с обязательным анализом полученных экспериментов по оценке метрологической исправности каждого применяемого блока в структуре ИИС.

Следовательно, требуемый уровень метрологической надежности должен закладываться при проектировании ИИС и контролироваться в процессе эксплуатации. В случае, если необходимо, то должна осуществляться коррекция математической модели МХ в процессе эксплуатации при проведении поверок. Обеспечение метрологической исправности ИИС является сложной технической и важной экономической задачей, направленной на верификацию получаемых с применением ИИС измерительных экспериментов и диагностические выводы о состоянии ИИС на этапе ее эксплуатации.

Предложен комплексный алгоритм оценки МН и МИ для реализации как на этапе проектирования, так и эксплуатации. Алгоритм реализует оценку МН на этапе проектирования ИИС и позволяет определять уровень МИ на очередной межповерочный интервал при эксплуатации ИИС.

Алгоритм основан на методе аналитико-вероятностного прогнозирования и включает в себя следующие этапы.

1. Математическое моделирование процесса функционирования проектируемого аналогового блока (АБ).
2. Математическое моделирование метрологической характеристики АБ.
3. Формирование математической модели изменения во времени метрологической характеристики на этапе проектирования с получением вероятностной оценки величины прогнозируемого метрологического ресурса АБ и ИИС в целом.

В случае несоответствия значений полученного показателя МН заданному значению на этапе проектирования осуществляется реализация одного из методов повышения МН. Выбор одного из существующих методов повыше-

ния МН (схемотехническая оптимизация, коррекция начального уровня точности и др.) осуществляется, исходя из специфики рассматриваемого блока и целей проектирования.

4. В дальнейшем полученные результаты прогноза МН используются на этапе эксплуатации ИИС. При этом важным условием на этапе эксплуатации ИИС является сохранение значений МИ на очередной межповерочный интервал.

5. В случае несоответствия в процессе эксперимента значений МХ при очередной поверке результатам, полученным по математической модели изменения во времени метрологической характеристики блока ИИС определенным на этапе проектирования, необходимо провести процедуру коррекции математической модели для дальнейшего использования ее для прогнозирования МИ блока на последующий межповерочный интервал.

6. Коррекция математической модели изменения во времени МХ осуществляется на этапе эксплуатации с помощью методов машинного обучения. При этом пользователь может выбрать адекватную модель для применения ее на следующем межповерочном интервале, исходя из базы данных, содержащей внесенные пользователем значения результатов проведенных предыдущих поверок исследуемого блока. Подбор адекватной модели проводится с выбором ее из хранящихся в информационно-аналитической системе видов математических моделей изменения во времени МХ: экспоненциальной, логарифмической, авторегрессионной и семейств полиномиальных и рациональных зависимостей.

7. При приближении величины времени очередной метрологической поверки к полученному ранее при проектировании значению метрологического ресурса и, соответственно, устанавливая, что при этом полученное прогнозируемое на этот межповерочный интервал значение МХ $\delta(t_{\text{пов}})$ приближается к допустимому , т.е. выполняется неравенство $\left|\delta_{\text{доп}} - \delta(t_{\text{пов}})\right| < \Delta$, дается рекомендация $\delta_{\text{доп}}$ на проведение ремонтно-профилактических работ для исследуемого блока в структуре ИИС. В случае невозможности проведения такого вида работ вносится решение о замене этого блока на метрологически исправный блок данного типа.

Следует отметить, что выбор численного значения Δ определяется уровнем метрологической ответственности этого блока в структуре измерительного канала ИИС.

Таким образом, предложенный комплексный алгоритм позволяет оценивать метрологическую исправность и, соответственно, МН блока, применяемого в структуре измерительного канала ИИС, как на этапе проектирования, так и в процессе его непрерывной эксплуатации в реальных условиях.

При этом оперативное применение методов машинного обучения по выбору адекватных моделей на очередной межповерочный интервал позволяет получить более высокую точность оценки времени метрологически исправной работы блока в структуре ИИС при ее непрерывной эксплуатации.

Библиографический список

1. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209 – 215.

2. Чернышова, Т. И. Применение методов математического моделирования при оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразователя / Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 589 – 594.

1. Автоматизация схемотехнического проектирования : учебное пособие для вузов / В. Н. Ильин, В. Т. Фролкин, А. И. Бутко и др. ; под ред. В. Н. Ильина. – М. : Радио и связь, 1987. – 368 с.

ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ АНАЛОГОВЫХ БЛОКОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ВЕРОЯТНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОТКАЗА

Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов, Н. И. Магомедов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail:islam.magomedov1975@gmail.com)

Современные информационно-измерительные системы (ИИС) находят широкое применение в различных отраслях промышленности и научных исследованиях. Качество функционирования таких измерительных средств, точность и достоверность получаемой измерительной информации определяется их метрологическими характеристиками (МХ). Уровень МХ и их изменения в процессе эксплуатации в измерительном эксперименте определяют метрологическую надежность (МН) ИИС и составляющих систему аналоговых блоков (АБ).

Оценка МН АБ ИИС на этапе проектирования с определением численных значений показателей МН является актуальной задачей. Достаточно часто для анализа уровня МН проектируемого измерительного средства используются вероятностные оценки: вероятности сохранения метрологической исправности и вероятность метрологического отказа [3]. В случае несоответствия расчета таких показателей требуемым значениям на этапе проектирования осуществляется решение задачи повышения МН.

Разработан алгоритм повышения МН АБ ИИС, позволяющий определить минимально возможные значения вероятности метрологического отказа в начальный момент времени путем выбора номиналов элементной базы

составляющих проектируемый АБ ИИС. Математическая формулировка такой задачи имеет вид:

$$P_{\text{отк}}(t) = P\left\{\left|\delta(t, \vec{\varphi}, \vec{\xi})\right| \geq \left|\delta_{\text{доп}}\right|\right\} \to \min, \text{ при } \delta(t, \vec{\varphi}, \vec{\xi}) = \text{var}, y(t, \vec{\varphi}, \vec{\xi}) \in A, \quad (1)$$

где $P_{\text{отк}}(t)$ – вероятность метрологического отказа; $\delta_{\text{доп}}$ – допустимое значение исследуемой метрологической характеристики (чаще всего, погрешности); t – время; $\vec{\varphi}$ – вектор внешних влияющих воздействий; $\vec{\xi}$ – вектор номиналов элементов; $y(t, \vec{\varphi}, \vec{\xi})$ – выходная характеристика АБ ИИС; A – область работоспособности.

При этом с учетом сложности схемного решения АБ и набора параметров элементной базы для решения поставленной задачи оптимизации (1) определяется степень влияния параметров каждого комплектующего АБ элемента на величину погрешности. Поиск оптимального значения выбранного критерия осуществляется по элементам, имеющих наибольшую степень влияния на МХ АБ.

На рисунке 1 представлена схема общего алгоритма повышения МН.

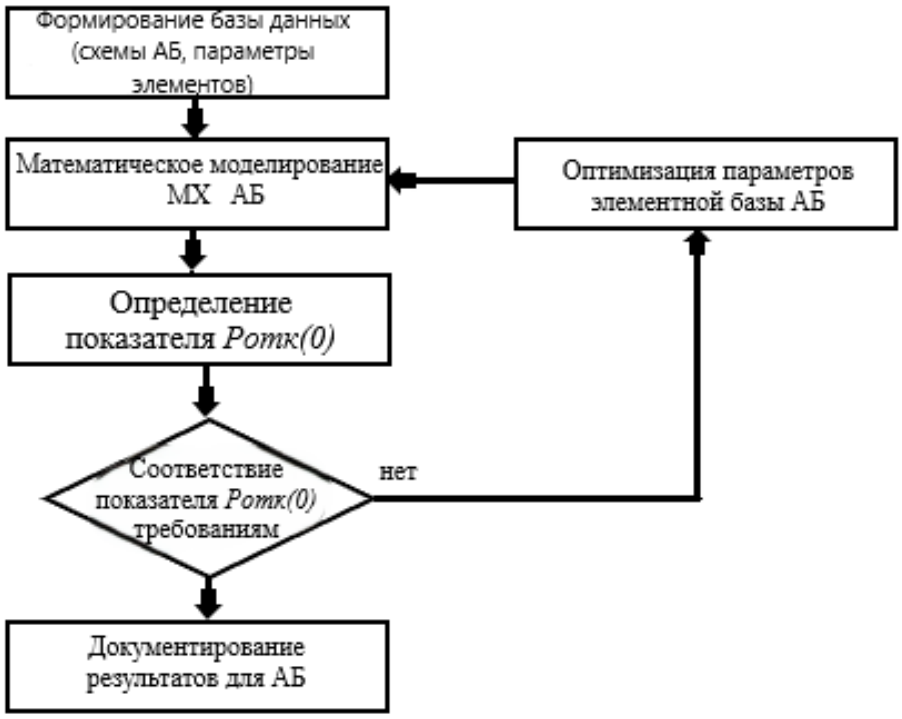


Рис. 1. Схема общего алгоритма повышения МН АБ ИИС

Для решения задачи такого плана могут применяться методы параметрической оптимизации, в том числе метод Розенброка, метод сопряженных направлений, метод покоординатного спуска.

Все перечисленные методы требуют многократного вычисления целевой функции, имеют разветвленные алгоритмы реализации, что приводит к большому объему вычислительных операций, особенно при большом числе варьируемых параметров элементной базы.

Предлагается подход, основанный на аналитико-вероятностном методе оценки МН с использованием сочетания статистического моделирования АБ с методами машинного обучения. Основным преимуществом является замена трудоемких схемотехнических расчетов быстрой нейросетевой суррогатной моделью, аппроксимирующей зависимость погрешности от параметров элементов.

Основные этапы алгоритма заключаются в следующем:

1. Генерация обучающей выборки – методом статистического моделирования в пределах допусков по варьируемым элементам с дальнейшим расчетом искомой погрешности. Полученная выборка разделяется на обучающую и тестовую.

2. Обучение нейросетевой суррогатной модели по выбору номиналов элементов. Для контроля проведенного обучения используется тестовая выборка.

3. Поиск рациональных параметров элементов АБ. На данном этапе с использованием обученной нейронной сети определяется минимум вероятности метрологического отказа. Для каждой комбинации элементов вычисляется вероятность отказа с определением его минимального значения при фиксированном наборе параметров элементов блока.

4. Верификация. Найденное решение может проверяться прямым моделированием в среде SpiceLT. При необходимости проверяются полученные значения параметров элементов АБ уточняются, ближайшие от найденных параметров значения, чтобы убедиться в точности достигнутого результата.

Сравнительный анализ применения разработанного алгоритма с использованием методов машинного обучения и традиционного метода параметрической оптимизации показал эффективность предложенного подхода для решения задачи повышения МН проектируемых АБ ИИС по трудоемкости вычислительных операций и скорости принятия проектных решений по анализу МН АБ.

Библиографический список

3. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209 – 215.

4. Чернышова, Т. И. Применение методов математического моделирования при оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразователя / Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 589 – 594.

5. Автоматизация схемотехнического проектирования : учебное пособие для вузов / В. Н. Ильин, В. Т. Фролкин, А. И. Бутко и др. ; под ред. В. Н. Ильина. – М. : Радио и связь, 1987. – 368 с.

Секция 3
МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ НАРКОЗНО-ДЫХАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ И РЕСПИРАТОРЫ: ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДИТЕЛИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Е. Д. Азарскова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: azarskowalena@yandex.ru)

Согласно прогнозам ВОЗ, к 2050 году ожидается увеличение заболеваемости хронической обструктивной болезни легких на 23%. Одновременно с этим, по имеющимся данным ежегодно в мире около 10% новорожденных рождаются преждевременно и требуют проведения респираторной терапии. В связи с этим аппараты искусственной вентиляции легких (ИВЛ) и наркозно-дыхательной терапии приобретают статус критически важного медицинского оборудования.

Современный аппарат ИВЛ представляет собой микропроцессорное устройство, основными компонентами которого являются: газовый блок (смешивает кислород и воздух в заданной пропорции), дыхательный контур (система трубок), увлажнитель (нагревает смесь до температуры тела), датчики и монитор [1]. Ключевым параметром является капнография – метод измерения уровня CO_2 в выдыхаемом воздухе, позволяющий оценить проходимость дыхательных путей и эффективность вентиляции [1]. Структура типового ИВЛ (рис. 1) представлена в виде датчиков давления в дыхательных путях, потока газа, концентрации кислорода, капнографа и пульсоксиметра [1, 2]. К устройствам управления относятся: микропроцессорный блок управления, сенсорный интерфейс, системы тревог. За устройство питания принимается сеть электропитания с резервными аккумуляторами, либо встроенный турбинный блок, обеспечивающий автономность от централизованных газовых систем.

Ведущими мировыми производителями являются Dräger (Германия), Hamilton Medical (Швейцария), GE Healthcare (США), Maquet (Швеция) [1]. Среди российских производителей существенного прогресса достигла госкорпорация Ростех с новой линейкой аппаратов ИВЛ «Мобивент», включающую пять изделий для различных сфер применения.

Перспективы развития связаны с импортозамещением [2, 3], развитием ЭКМО, внедрением искусственного интеллекта для прогнозирования состояния пациента, совершенствованием неонатальной поддержки, созданием единых цифровых платформ мониторинга [4].

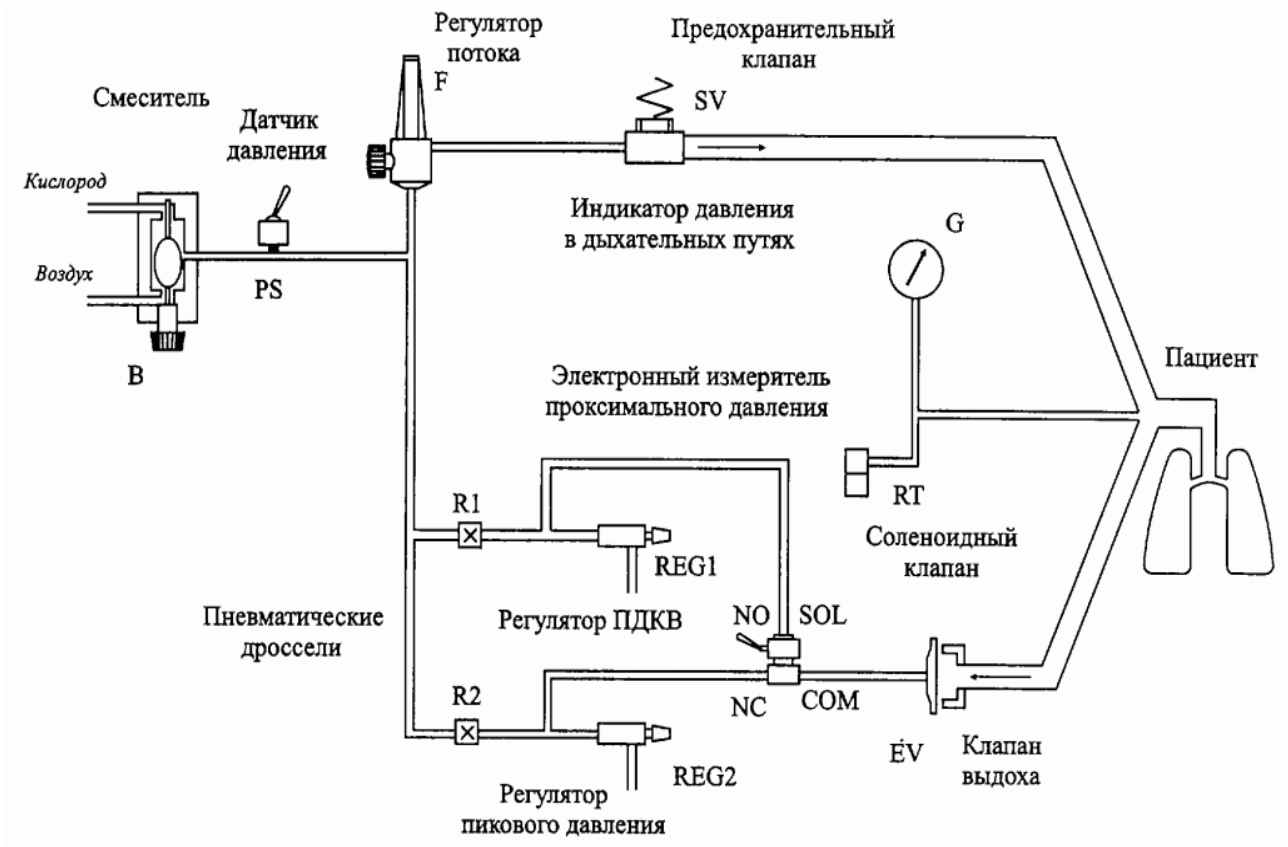


Рис. 1. Структурная схема современного аппарата ИВЛ

Библиографический список

1. Полушин, Ю. С. Анестезиология и реаниматология: национальное руководство / Ю. С. Полушин. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2022. – 672 с.

2. Госкорпорация «Ростех». От портативных ИВЛ до морозильных ларей: Ростех показал новейшие медразработки // Московские аптеки. – 15.05.2025. – URL : https://mosapteki.ru/material/ot-portativnyx-ivl-do-morozilnyx-lareyo-rostex-pokazal-noveyoshie-medrazrabotki-31090 (дата обращения: 06.05.2026).

3. Коновалова, К. Н. Инновации в информационной модели аппарата искусственной вентиляции легких / К. Н. Коновалова, Т. А. Фролова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы VI Междунар. науч.-прак. конф., Тамбов, 16 – 18 октября 2019 года. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2020. – Т. 2, Вып. 6. – С. 229 – 232.

4. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

СИСТЕМА ЗАМКНУТОГО КОНТУРА ЭЭГ-БОС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЗВУКОВОГО СТИМУЛА

Н. О. Алексеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия
(e-mail:noa7@tpu.ru)

В последние годы наблюдается рост интереса к немедикаментозным методам коррекции психоэмоциональных состояний, направленных на снижение уровня тревожности и стресса. Одним из таких методов является биологическая обратная связь (БОС), основанная на регистрации физиологических сигналов и их последующем преобразовании в сенсорные стимулы [1].

В системах энцефалографической БОС особый интерес представляет использование аудиальной обратной связи, так как слуховой канал обеспечивает непрерывное восприятие информации без необходимости визуального контроля [2].

Целью работы является разработка программно-аппаратной системы биологической обратной связи на основе ЭЭГ с реализацией многопараметрического управления аудиальным стимулом.

На рисунке 1 представлена схема замкнутого контура биологической обратной связи, реализуемая в данной системе.

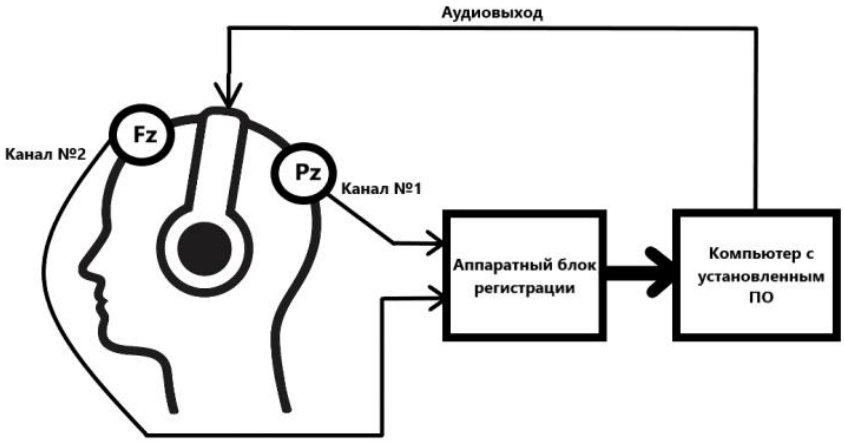


Рис. 1. Схема замкнутого контура ЭЭГ-БОС, реализуемая в разрабатываемой системе

Регистрация электроэнцефалографических сигналов осуществляется с использованием двух монополярных отведений, расположенных в позициях Fz и Pz согласно системе «10–20» [3]. В аппаратном блоке сигналы усиливаются, фильтруются в полосе частот 0,5…40 Гц и оцифровываются 24-разрядным аналого-цифровым преобразователем. Управление процессом регистрации и передачи данных выполняется с помощью микроконтроллера.

Обработка сигналов выполняется в программном модуле и включает спектральный анализ методом Уэлча. Для каждого временного окна вычисляется спектральная плотность мощности сигнала, на основе которой определяется энергия сигнала и его альфа-компоненты.

Полученные параметры используются для многопараметрического управления аудиальным стимулом. Средний альфа-индекс определяет громкость звука, отражая уровень расслабления пользователя. Альфа-индекс рассчитывается как отношение энергии сигнала в альфа-диапазоне к полной энергии сигнала (*AI* – альфа-индекс, E_α – энергия альфа-ритма, E – энергия сигнала):

$$AI = \frac{E_\alpha}{E}. \quad (1)$$

Для повышения информативности анализа используется коэффициент когерентности между каналами, который определяет тембр звучания (N_α – количество частотных отсчетов, $S_{Pz,\ Fz}(f_i)$ – взаимная спектральная плотность мощности *Pz-Fz*, $S_{Pz,\ Pz}(f_i)$ – спектральная плотность мощности в отведении *Pz*, $S_{Fz,\ Fz}(f_i)$ – спектральная плотность мощности в отведении *Fz*):

$$Coh_\alpha = \frac{1}{N_\alpha} \sum_{f_i \in [8,13]} \frac{\left| S_{Pz,Fz}(f_i) \right|^2}{S_{Pz,Pz}(f_i) S_{Fz,Fz}(f_i)}. \quad (2)$$

Разработанная система может применяться в задачах тренировки саморегуляции и коррекции тревожных состояний. Дальнейшая работа связана с экспериментальной апробацией комплекса.

Библиографический список

1. Тарасова, Е. М. Биологическая обратная связь в нейрореабилитации (современный обзор) / Е. М. Тарасова, Т. С. Петренко, В. И. Борисов // Вестник УГМУ. – 2024. – № 1. – С. 27 – 39.
2. Comparison of Visual and Auditory Modalities for Upper-Alpha EEG-Neurofeedback / T. Bucho, G. Caetano, A. Vourvopoulos, et al. // 2019 IEEE 6th Portuguese Meeting on Bioengineering. – 2019. – P. 5960 – 5964.
3. Jasper, H. H. The ten-twenty electrode system of the International Federation / H. H. Jasper // Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. – 1958. – V. 10. – P. 371 – 375.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЫНКА ОБОРУДОВАНИЯ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОВ

М. А. Анохин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: maksimanohin123@mail.ru)

Рынок оборудования медицинских роботов в 2026 году находится в фазе экспоненциального роста, переходя от нишевых решений к стандарту оказания высокотехнологичной помощи. Актуальность темы обусловлена не только глобальным дефицитом квалифицированных хирургов и старением населения, но и сменой технологической парадигмы: от простых ассистирующих механиз-

мов к интеграции физического искусственного интеллекта (ИИ) и автономности. Ключевыми драйверами выступают цифровизация здравоохранения, применение нейросетевых технологий, требование к прецизионности малоинвазивных вмешательств и необходимость автоматизации рутинных процессов в больницах [1, 2].

Для Российской Федерации прорывным событием 2026 года стала регистрация первого отечественного хирургического робота, что знаменует переход от полной импортозависимости к формированию собственного технологического суверенитета в этом сегменте. По данным аналитических агентств, объем мирового рынка медицинских роботов в 2026 году оценивается в диапазоне от 20,1 до 32,8 млрд долларов, демонстрируя беспрецедентный среднегодовой темп роста (CAGR) на уровне 20,2%. Прогнозируется, что к 2030 – 2035 годам рынок достигнет 42…48 млрд долларов.

Доминирующее положение занимают хирургические роботы (около 50% рынка), за которыми следуют реабилитационные роботы и роботы для автоматизации больниц (логистика, аптеки). Важнейшим трендом последних лет стала конвергенция робототехники и ИИ: технологии глубокого обучения встраиваются непосредственно в консоли управления, ускоряя принятие решений и снижая нагрузку на персонал [3]. Рынок хирургических роботов по-прежнему консолидирован вокруг глобальных лидеров, хотя монополия постепенно размывается появлением новых игроков.

Современная технологическая гонка сместилась в область тактильной обратной связи и автономности. Прорывом 2026 года стало получение FDA разрешения на систему da Vinci 5 для кардиохирургии. Новая платформа оснащена индикатором усилий на тканях, позволяя хирургу буквально «чувствовать» материал инструмента, что повышает безопасность операций.

В ответ на запросы персонализированной медицины активно развивается направление «физического ИИ». На выставке CES 2026 был представлен робот Dynamis от LEM Surgical – первый «хирургический гуманоид», архитектура рук которого имитирует бимануальную ловкость человека. Платформа будет работать на базе NVIDIA Jetson Thor, что позволит роботу обучаться и адаптироваться к действиям хирурга.

Российский рынок хирургических роботов долгое время был полностью зависим от импортных поставок (в первую очередь, da Vinci). Однако в начале 2026 года произошло историческое событие: Министерство здравоохранения РФ зарегистрировало первый отечественный хирургический робот-ассистент. Это событие является результатом активной фазы локализации производства при участии государства и крупных корпораций, подпадая под стратегию достижения технологического суверенитета в сфере здравоохранения. Для России критически важным событием 2026 года стала регистрация собственного хирургического робота, что позволит обеспечить технологическую независимость и обновить парк оборудования в условиях санкционных ограничений. Учитывая прогнозируемый рост рынка до 2035 года, ниша для отечественных и дружественных азиатских производителей (Китай, Индия) остается крайне перспективной [3].

Библиографический список

1. Использование нейроконтроллера и электрохромного остекления в инкубаторах для новорожденных для адаптивной имитации смены дня и ночи / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова // Медицинская техника. – 2024. – № 4(346). – С. 14 – 16.

2. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

3. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова, // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

ЗАЩИЩЕННЫЕ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИЕ КОМПЛЕКСЫ С ИНТЕГРАЦИЕЙ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

А. С. Баршутина[1], С. Н. Баршутин[2]

[1]РХТУ имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия
(e-mail: barshutinaas@yandex.ru)
[2]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
(e-mail: barshutin@mirea.ru)

Традиционная фармакология сегодня все плотнее срастается с биоинженерией и цифровыми сервисами. Речь уже не просто о телемедицине для дистанционных консультаций, а о интегрировании платформ с биосенсорами. Эти устройства непрерывно «считывают» фармакодинамику, при этом отслеживается как меняется концентрация активного вещества в плазме, как работают метаболиты, как ткань реагирует на препарат. Проблема в том, что поток таких данных нужно куда-то передавать, причем без задержек. А где есть открытая передача медданных в реальном времени, там мгновенно всплывает вопрос информационной безопасности. Если злоумышленник или сбой на уровне сети подкрутит цифры, врач может изменить дозировку в худшую сторону. Итог – смазанная клиническая картина и реальный риск для жизни пациента. Именно поэтому в данной работе мы разбираем, как именно на архитектурном и криптографическом уровнях выстроить сквозную защиту для систем удаленного мониторинга терапии.

Рассмотрим как это выглядит на практике. Обычно такой защищенный комплекс собирают из трех слоев. На самом низу – периферия, т.е. сами носимые или вживляемые датчики. Посередине находится сетевой уровень, где работают шлюзы с аппаратным ускорением шифрования. Наверху – облако, в котором крутится аналитика и интерфейс для лечащего врача. Сложность в том, что сенсоры генерируют огромный массив данных с высокой частотой опроса. Фармакодинамика – штука динамическая, она жестко привязана

к текущему состоянию человека. Здесь нет права на ошибку: отклонение показателя даже на 5…10% может означать, что препарат либо вообще не работает, либо уже стал токсичным. Из-за этой сверхчувствительности требования к задержкам становятся экстремальными – трансляция не должна тормозить больше чем на 50 мс [2]. Секретность и целостность каждого пакета выходят на первый план.

Теперь о том, кто и как может этому навредить. Транспортный канал – самое слабое звено. Он открыт для классических атак типа «человек посередине» (MitM), спуфинга (подмены самого датчика) и вброса фейковых пакетов телеметрии. Представьте, что система управления решает, будто концентрация лекарства в крови ниже, чем есть на самом деле, и автоматически повышает дозу – это прямая дорога к передозировке. Но есть и менее очевидная угроза – атаки на синхронизацию времени. Фармакокинетика считается буквально по секундам, и сбитые временные метки просто сломают расчетную модель. Чтобы закрыть эти векторы, классической защиты периметра уже недостаточно. Выручает архитектура нулевого доверия (Zero Trust): мы физически привязываем криптоключи к «железу» и заставляем систему на каждом шагу маршрутизации заново доказывать, что этому узлу действительно можно доверять.

Защита IoT-среды требует применения адаптированных версий TLS 1.3 и DTLS 1.3. Эфемерный обмен ключами по схеме ECDHE комбинируется с предварительно распределенными PSK. Это гарантирует прямую секретность и устойчивость сессии при кратковременных разрывах связи. Для устройств с ограниченным энергопотреблением используются облегченные аутентифицированные шифры. В среднесрочной перспективе целесообразен поэтапный переход на постквантовые алгоритмы, особенно для долгосрочного хранения терапевтических архивов.

Аутентификация реализуется по взаимной схеме mTLS с обязательной аппаратной аттестацией. Каждый сенсор получает уникальный сертификат X.509, при этом он криптографически сцеплен с физически неклонируемой функцией. В дополнение применяется физиологическая верификация в виде вариабельности ЭКГ-сигнала пациента, который используется как динамический биометрический ключ, подтверждающий источник данных [1].

В пилотных клинических сериях такая связка уже показала снижение ошибок дозирования на 30…40%, а реакция на нежелательные явления стала существенно быстрее. Связка биосенсоров, фармакокинетических моделей и криптографических контуров постепенно перестает быть лабораторной конструкцией. Сквозное шифрование, аппаратная аттестация оконечных устройств и биометрическая привязка работают не изолированно, а как единый барьер, соответственно даже при рваной связи терапевтический сценарий остается целостным и защищенным от несанкционированных изменений. Чтобы масштабировать такие системы, придется решать не только инженерные задачи. Врачам, разработчикам и регуляторам нужно будет договориться о единых метриках надежности, а сами протоколы необходимо научить стабильно функционировать там, где сеть нестабильна или задержки непредсказуемы. Если

этот пазл сложится, защищенные телемедицинские контуры перестанут быть «страховкой на крайний случай» и станут рабочим стандартом для точной фармакотерапии.

Библиографический список

1. Asadianfam, S. ECG-based authentication systems : a comprehensive and systematic review / S. Asadianfam, M. J. Talebi, E. Nikougoftar // Multimedia Tools and Applications. – 2024. – V. 83, Is. 9. – P. 27647 – 27701.

2. Upadhyay, N. K. Lightweight Cryptographic Protocols for Enhanced Security in the IoT : A Survey / N. K. Upadhyay, S. Periyasamy, V. Kumar // 2025 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Theme: Healthcare and Internet of Things (AIMLA). – IEEE, 2025. – P. 634 – 639.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СЕНСОРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. Р. Боймирзаев, Р. Р. Эргашев

Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
(e-mail: anvarjon.ferpi@gmail.com; ergashevs0213@gamil.com)

В последние годы, в результате стремительного развития науки и техники сенсорные технологии стали важным научно-техническим направлением [1 – 3]. Датчики – это устройства, позволяющие обнаруживать, измерять и преобразовывать физические, химические и биологические изменения во внешней среде или в организме человека в сигналы.

В настоящее время сенсорные технологии широко используются не только в промышленной и технической сферах, но и в медицине, экологии, сельском хозяйстве и повседневной жизни. Их развитие играет важную роль в улучшении качества жизни человека, ранней диагностике заболеваний и повышении эффективности производства.

В развитии сенсорных технологий выделяют несколько основных направлений. Сенсоры, созданные на основе миниатюризации и нанотехнологий, обладают высокой точностью и чувствительностью. Наносенсоры позволяют обнаруживать изменения на молекулярном уровне, что особенно важно при ранней диагностике онкологических и генетических заболеваний. Развиваются интеллектуальные сенсорные системы. Такие системы оснащены элементами искусственного интеллекта, которые автоматически анализируют полученные данные и предоставляют пользователю точные результаты. Это снижает количество ошибок, связанных с человеческим фактором. Датчики интегрируются с Интернетом вещей (IoT). Датчики на основе IoT соединены с различными устройствами, передавая и обрабатывая большие объемы данных. Это способствует развитию «умных городов», «умных домов» и систем промышленной автоматизации.

Сенсорные технологии играют особую роль в медицине. Современные биосенсоры позволяют выявлять заболевания на ранней стадии, определяя состав биологических жидкостей. Например, датчики глюкозы широко используются в контроле диабета.

Кроме того, носимые устройства – умные часы, фитнес-трекеры – отслеживают частоту сердечных сокращений, артериальное давление, физическую активность и качество сна человека. Это вносит существенный вклад в развитие профилактической медицины. В сенсорных технологиях в качестве чувствительных элементов широко используются полупроводниковые материалы, полимеры и биологические компоненты. Принцип их работы основан на изменении электрических сигналов под воздействием измеряемой величины. Современные сенсорные системы используют беспроводные технологии связи, создавая возможность дистанционной передачи данных. Это особенно важно в телемедицине и системах дистанционного мониторинга. Многоканальные сенсорные системы также позволяют одновременно контролировать сложные процессы. В результате значительно повышается точность и эффективность систем управления. Современные датчики обладают высокой чувствительностью и способны обнаруживать очень малые физические и химические изменения. Сенсорные устройства обычно состоят из чувствительного элемента, блока обработки сигнала и системы передачи. В настоящее время широко используются оптические, электрохимические и пьезоэлектрические датчики.

В сенсорных технологиях важны усиление сигнала и снижение уровня шума, поэтому в современных устройствах используются цифровые фильтры и алгоритмы обработки сигналов. Полученные с помощью датчиков данные быстро анализируются, и пользователю предоставляются точные результаты.

Несмотря на прогресс в сенсорных технологиях, существуют некоторые проблемы. Среди них основными являются высокая стоимость, техническая сложность, энергопотребление и безопасность данных.

В будущем ожидается, что датчики станут дешевле и энергоэффективнее. Также увеличится интеграция с искусственным интеллектом, что позволит создавать полностью автоматизированные медицинские системы. В сенсорных технологиях скорость и точность передачи данных являются одними из важных показателей. Поэтому в современных системах широко используются Bluetooth, Wi-Fi и другие беспроводные технологии связи. Полученные от датчиков данные обрабатываются специальным программным обеспечением и представляются в виде графиков и таблиц. Кроме того, датчики являются ключевым элементом систем автоматического управления. Они позволяют оптимизировать управление производственными процессами. В частности, в промышленных роботах датчики играют ключевую роль в обнаружении окружающей среды и корректном реагировании. Еще одним важным аспектом сенсорных технологий является их надежность и стабильная работа. Поэтому их устойчивость к внешним воздействиям имеет важное значение при их разработке. Например, создаются датчики, способные работать даже в условиях высокой температуры, влажности или давления. Кроме того, современные датчики, несмотря на свои небольшие размеры, обладают высокой функциональностью, что позволяет использовать их в различных портативных устройствах.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.
2. Фролова, М. С. Оптимальный выбор изделия медицинской техники с использованием информационных систем в здравоохранении / М. С. Фролова, С. В. Фролов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 553 – 561.
3. Фролова, М. С. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / М. С. Фролова, С. В. Фролов, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Специальный выпуск 52. – С. 106 – 111.

БАНК УЧЕБНЫХ КЕЙСОВ ПО ДИАГНОСТИКЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ: ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА

Р. В. Бордуков, Т. А. Фролова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: bordukovvit@gmail.com)

Интерактивные веб-платформы, имитирующие процесс диагностики, позволяют студенту самостоятельно проходить путь от первичного осмотра до выявления корневой причины неисправности, получая при этом подробную обратную связь. Проект «Банк учебных кейсов по диагностике неисправностей медицинской техники» направлен на решение указанной проблемы путем создания структурированной базы мультимедийных кейсов с разветвленным деревом принятия решений.

Разрабатываемая платформа представляет собой образовательный веб-сайт, предназначенный для студентов 3–4 курсов и магистрантов, изучающих эксплуатацию и ремонт медицинского оборудования. Основная идея заключается в создании библиотеки интерактивных клинико-технических сценариев, каждый из которых воспроизводит реальную ситуацию отказа прибора.

Функциональная структура сайта включает три ключевых модуля: *пользовательский интерфейс обучающегося, панель преподавателя-администратора и систему аналитики*.

Главная страница представляет собой каталог кейсов с фильтрацией по типу оборудования (электрокардиографы, аппараты ИВЛ, инфузоматы, ультразвуковые сканеры, пульсоксиметры и др.), классу неисправности (помехи, механические дефекты, сбои калибровки, ошибки датчиков) и уровню сложности. Каждый кейс содержит: вводную информацию о симптомах (видеозапись

экрана прибора, показания датчиков, звук аларма); интерактивную схему аппарата с выделенными контрольными точками; виртуальный измерительный инструментарий (мультиметр, осциллограф), активируемый при клике на соответствующую точку; и дерево принятия решений, где студент выбирает последовательность диагностических действий. Система фиксирует каждый шаг, оценивает эффективность маршрута и по завершении выдает развернутое заключение с объяснением оптимального алгоритма и ссылками на техническую документацию.

Личный кабинет обучающегося сохраняет историю пройденных кейсов, статистику успешности и формирует индивидуальные рекомендации по типам отказов, требующих дополнительной проработки. Преподаватель через административную панель может создавать новые кейсы без навыков программирования: загружать медиаматериалы, расставлять контрольные точки на схеме, задавать измеряемые значения и логику переходов между шагами диагностики.

Разработка ведется поэтапно. На первом этапе создается минимально жизнеспособный продукт: базовая структура каталога, один полностью проработанный кейс (например, «Дрейф изолинии электрокардиографа из-за нарушения контакта нейтрального электрода»), простейшая админ-панель для добавления содержимого. Второй этап предполагает расширение функционала до полноценного редактора кейсов и внедрение системы аналитики успеваемости. Параллельно с разработкой ведется методическая работа по созданию контента: готовятся сценарии не менее 10 кейсов, охватывающих основные типы приборов, записываются видеоматериалы в сотрудничестве с сервисными инженерами клиник [1, 2].

Платформа может быть развернута на сервере университета и интегрирована в учебный процесс в рамках дисциплин «Эксплуатация и ремонт медицинской техники», «Техническое обслуживание биомедицинского оборудования» и производственной практики. Предусмотрена возможность использования как для аудиторных лабораторных работ, так и для самостоятельной подготовки студентов. Ожидаемые результаты внедрения – повышение качества практической подготовки инженеров, сокращение времени адаптации выпускников на реальных рабочих местах и формирование у обучающихся устойчивых навыков системного подхода к поиску неисправностей.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

2. Фролов, С. В. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / С. В. Фролов, М. С. Фролова, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Специальный выпуск (52). – С. 105 – 110.

ПРИНЦИПЫ ХРАНЕНИЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ В АПТЕКАХ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ СТАНДАРТА GPP

Т. З. Ганиева

Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
(e-mail: ganiyevatojixon09@gmail.com)

На сегодняшний день одной из основных задач фармацевтической системы является обеспечение населения качественными, безопасными и эффективными лекарственными средствами. Качество лекарственных препаратов зависит не только от процесса производства, но и от условий их транспортировки, хранения и реализации. В связи с этим актуальным вопросом является хранение лекарственных средств в аптеках в соответствии с международными стандартами [1].

Хранение лекарственных средств в аптеке осуществляется в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами, условиями, указанными производителем на упаковке, а также требованиями Надлежащей практики хранения (GSP/GPP).

Помещения, в которых хранятся лекарственные препараты и изделия медицинского назначения, должны быть спроектированы и адаптированы таким образом, чтобы поддерживать необходимый температурный режим и относительную влажность.

В аптеке определяются важные точки, в которых требуется контроль условий хранения лекарственных препаратов, и в соответствии с этим устанавливаются приборы для контроля данных параметров. Для каждой контрольной точки устанавливаются допустимые значения температуры и влажности на основании требований, определенных производителями лекарственных средств, изделий медицинского назначения и других товаров аптечного ассортимента.

В каждой необходимой точке для регистрации параметров воздуха должен быть размещен стационарный или переносной прибор. В помещениях контрольные приборы размещаются на расстоянии 1 м от отопительных приборов, на высоте 1,5…1,7 м от пола и на расстоянии не менее 1 м от двери.

Основное требование при хранении лекарственных средств в аптеках – строгое соблюдение условий, указанных производителем. Каждый лекарственный препарат имеет свой специфический температурный режим хранения. Некоторые препараты хранятся при низкой температуре (от +2 до +8 °C), в то время как другие – при комнатной температуре (от +15 до +25 °C).

Ежедневно, три раза в день, назначенный фармацевтический работник аптеки должен проверять температуру и влажность в точках установки в помещениях для хранения и записывать показатели приборов в «Журнал ежедневной регистрации параметров температуры и влажности в помещениях для хранения». Ежедневно, перед началом и по окончании рабочего дня, назначенный сотрудник должен проверять температуру в холодильниках и заносить показа-

тели в «Журнал периодической регистрации температуры внутри холодильного оборудования».

Заведующий аптекой в течение недели должен проверять журналы мониторинга и вносить в них записи о результатах проверки. При выявлении отклонений параметров хранения лекарственных препаратов или изделий медицинского назначения от установленных оптимальных/ рекомендуемых значений, назначенный сотрудник аптеки должен немедленно принять меры по устранению отклонений и зафиксировать все действия в журнале мониторинга.

Согласно стандартам GPP, в аптеках должны выполняться следующие требования:

- помещения для хранения должны быть чистыми, сухими и проветриваемыми;
- показатели температуры и влажности должны находиться под постоянным контролем;
- оснащение специальными термометрами и гигрометрами;
- размещение лекарственных средств по фармакологическим группам;
- раздельное хранение средств для внутреннего и наружного применения;
- хранение ядовитых, наркотических и сильнодействующих средств в отдельных сейфах или шкафах;
- хранение препаратов, разлагающихся под воздействием света, в темном месте;
- осуществление регулярного контроля сроков годности.

В аптеках важное значение имеет размещение продукции на основе принципов FIFO («первым пришел – первым ушел») и FEFO («кратчайший срок годности – первым ушел»). Эти методы предотвращают появление продукции с истекшим сроком годности.

Также в помещениях, где хранятся лекарственные средства, должны соблюдаться санитарно-гигиенические правила. Вредители, пыль, влага и солнечный свет отрицательно влияют на качество продукции.

В целом, хранение лекарственных средств в аптеках на основе требований стандартов GPP является одним из важных факторов повышения качества фармацевтических услуг. Правильно организованная система хранения сохраняет качество, безопасность и эффективность лекарственных средств. В результате расширяются возможности оказания качественной фармацевтической помощи населению.

Библиографический список

1. Шнякина, Я. И. Методика подбора медицинского оборудования в соответствии со стандартом оснащения / Я. И. Шнякина, А. Р. Аветисян, Т. А. Фролова // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием ; Тамбов, 7 мая 2024 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»», 2024. – С. 311 – 313.

СОВРЕМЕННЫЕ СЛУХОВЫЕ АППАРАТЫ: ТЕХНОЛОГИИ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Р. Н. Гасанов, Д. А. Скачкова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: rg570424@gmail.com)

Потеря слуха – одна из самых распространенных сенсорных патологий. По данным ВОЗ, более 1,5 млрд человек живут с нарушением слуха, из них 430 млн нуждаются в реабилитации. К 2050 году прогнозируется рост числа людей с тугоухостью до каждого четвертого жителя планеты. Слуховые аппараты остаются основным методом реабилитации, представляя собой сложные цифровые устройства, адаптирующиеся к акустической среде. На рисунке 1 представлены слуховые аппараты разных эпох.



Рис. 1. Слуховые аппараты разных эпох: современный (слева) и аппарат 1990-х годов

Слуховой аппарат преобразует акустический сигнал в электрический, обрабатывает его цифровыми методами и возвращает в усиленный звук. Основные компоненты: микрофон, АЦП, цифровой сигнальный процессор, усилитель и receiver (динамик). Цифровая обработка включает фильтрацию, шумоподавление, подавление обратной связи и частотно-зависимое усиление.

Мировой рынок высококонсолидирован. Лидеры: швейцарская Sonova (Phonak), датские Demant (Oticon), WS Audiology (Signia, Widex), GN Store Nord (ReSound), американская Starkey. Эти компании внедряют ИИ и беспроводные технологии. В России успешно развивается производство: компания «Аурика» (Тульская область) поставляет аппараты в страны СНГ, Египет, Иран, Алжир и Тунис.

Современные аппараты используют ИИ и нейросети. В Beltone применена двухчиповая архитектура: один чип анализирует среду, второй формирует направленный луч микрофонов на говорящего. Улучшение отношения сигнал/шум достигает 7,6 дБ. Плюсом аппарата является высокое качество звука, разборчивость речи в шуме, отсутствие обратной связи, интеграция с электроникой. Минусом является высокая стоимость, необходимость замены батарей, требования к уходу, психологический дискомфорт.

Перспективным направлением развития данной отрасли является совершенствование алгоритмов ИИ для выделения речи, интеграция биодатчиков (пульс, температура), миниатюризация, рост энергоэффективности, развитие безрецептурного сегмента, персонализация на основе анализа больших данных [1, 2].

Слуховые аппараты эволюционировали от простых усилителей до многофункциональных устройств, интегрированных в цифровую экосистему. Благодаря ИИ, беспроводной связи и биосенсорике, они не только компенсируют потерю слуха, но и повышают качество жизни. Российские производители создают конкурентоспособную продукцию и выходят на международные рынки [3].

Библиографический список

1. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

2. Использование нейроконтроллера и электрохромного остекления в инкубаторах для новорожденных для адаптивной имитации смены дня и ночи / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова // Медицинская техника. – 2024. – № 4(346). – С. 14 – 16.

3. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЫНКА ОБОРУДОВАНИЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

А. А. Горянников

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tstu@tstu.ru)

Рынок магнитно-резонансной томографии (МРТ) в 2026 году переживает фазу активной трансформации. Актуальность темы связана не только со стабильным ростом спроса на прецизионную диагностику в связи с глобальным старением населения и ростом онкологических и неврологических заболеваний, но и сменой технологических приоритетов. Ведущие мировые производители смещают фокус с простого наращивания мощности на интеграцию искусственного интеллекта (ИИ), экологичность и адаптивность оборудования к различным клиническим сценариям. Для РФ особенно остро стоит вопрос технологического суверенитета и импортозамещения в сфере тяжелого медицинского оборудования, что делает анализ текущего состояния рынка особенно значимым [1 – 3].

По данным аналитических агентств, объем мирового рынка МРТ-оборудования в 2025 году оценивался в 8,15 млрд долларов США, с прогнозируемым

ростом до 14,02 млрд к 2034 году при среднегодовом темпе роста 6,35%. Ключевой тенденцией является структурный сдвиг в сторону премиализации (активное внедрение томографов 3 Тл и выше) в развитых странах, в то время как в странах с развивающейся экономикой расширяется сегмент низкопольных и сверхпроводящих 1,5 Тл систем для базовой диагностики. Важнейшим трендом последних лет стал ИИ: технологии глубокого обучения встраиваются непосредственно в консоли управления, ускоряя реконструкцию изображений и снижая нагрузку на персонал.

Рынок высокопольных и сверхвысокопольных МРТ по-прежнему консолидирован вокруг трех глобальных лидеров: Siemens Healthineers, GE HealthCare и Philips Healthcare, при усиливающемся влиянии японских компаний Canon Medical Systems, Fujifilm, Hitachi.

Современная технологическая гонка сместилась в область эксплуатационных характеристик и устойчивости. Ключевым прорывом 2026 года стало получение Siemens Healthineers разрешения Food and Drug Administration – Управление по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств (FDA) на систему MAGNETOM Flow (1,5 Тл). Данная платформа использует технологию DryCool, делающую магнит практически безгелиевым. Это решение снижает зависимость клиник от изменений цен на жидкий гелий, упрощает монтаж и уменьшает совокупную стоимость владения. В премиальном сегменте 3 Тл лидирующие позиции занимают SIGNA Architect от GE с поддержкой AIR Recon DL и MAGNETOM Vida от Siemens, оснащенный технологией BioMatrix, учитывающей физиологические особенности пациента для получения стабильно высокого качества изображений.

В ответ на запросы персонализированной медицины активно развивается направление сверхвысокопольных томографов (7 Тл). MAGNETOM Terra.X от Siemens остается одним из двух клинически одобренных 7T томографов наряду с GE SIGNA 7T, который получил регистрацию в Китае в начале 2026 года, позволяющим визуализировать микроструктуру мозга при болезни Альцгеймера.

Российский рынок МРТ долгое время был полностью зависим от импортных поставок. Однако в настоящее время наблюдается активная фаза локализации производства при участии государства и крупных корпораций. Ключевым игроком выступает Госкорпорация «Росатом». Первый опытный образец российского МРТ-сканера с локализацией 40% планируется запустить в 2026 году и установить в реальном медицинском учреждении для клинических испытаний.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Информационный анализ эндоскопических зондов для оптической когерентной томографии / С. В. Фролов, А. Ю. Потлов, Т. А. Фролова // Цифровая трансформация в энергетике : материалы Всерос. науч. конф. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – С. 394 – 397.

2. Исследование геометрии и механических свойств атеросклеротических бляшек на стенках сосудов методами интраваскулярной оптической когерентной томографии / С. В. Фролов, А. Ю. Потлов, Т. А. Фролова, С. Г. Проскурин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 42 – 49.

3. Фролов, С. В. Тенденции индустрии медицинских устройств / С. В. Фролов, Т. А. Фролова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – С. 294 – 297.

РОЛЬ ИСКУССТВЕНОГО ИНТЕЛЛЕКТА В БИОПРОТЕЗИРОВАНИИ ВЕРНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Я. В. Долгов, Е. П. Евстигнеева, Д. Е. Судаков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: 2yaroslav00000@mail.ru)

Утрата верхней конечности вследствие травмы или врожденной патологии приводит не только к физическому дефициту, но и к серьезному снижению качества жизни, ограничивая способность к самообслуживанию. Современным стандартом реабилитации являются активные бионические протезы, работающие на основе электромиографии – считывания электрических потенциалов с мышц культи. Однако сейчас используют только сжатие и разжатие: многие современные системы используют лишь две крупные мышцы предплечья, что делает управление сложным. Вопросы механики и автономности постепенно решаются, но проблема интуитивного многовариантного управления оставалась открытой [1 – 4].

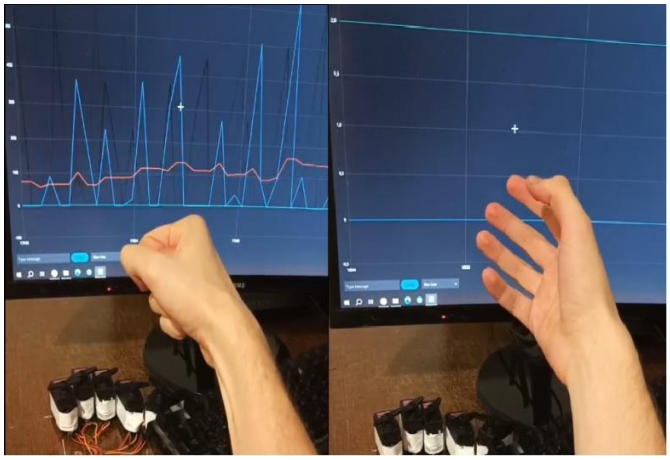


Рис. 1. Активность мышцы при сокращении и расслаблении:
слева – сокращена; справа – расслаблена

Традиционные алгоритмы основаны на линейной зависимости между амплитудой сигнала и усилием, что не позволяет распознавать сложные координированные движения пальцев или запястья. Между тем ЭМГ-сигнал содер-

жит богатую информацию в виде пространственно-временных паттернов, соответствующих различным двигательным намерениям. Разработчики применяют алгоритмы машинного обучения, анализирующие не только амплитуду, но и форму сигнала: это позволяет пациенту одним движением выбирать любой из девяти хватов с точностью 98%. Ведутся работы по распознаванию до 18 вариантов захвата.

Ключевой элемент интеллектуальных протезов – многоканальные ЭМГ-сенсоры высокого разрешения. Данные фильтруются от шумов и поступают в нейронную сеть. Нейросетевые модели, обученные на тысячах образцов, выявляют паттерны, характерные для конкретного хвата или жеста. Применение гибридных нейронных сетей позволяет управлять каждым пальцем по отдельности. В ходе индивидуальной калибровки создается персонализированная модель, адаптированная к физиологии пациента.

Интеграция нейросетей в управление протезами кисти выводит реабилитацию на новый уровень. Преодолевая ограничения традиционных ЭМГ-систем, «умные» протезы возвращают способность к тонкой моторике и повышают социальную независимость. Дальнейшее развитие будет сосредоточено на оптимизации архитектур для маломощных бортовых процессоров, совершенствовании методов вживления нейроимплантов и создании доступных протезов из пластика и гибких конструкций вместо металла. Ожидается, что прототип такого изделия появится уже в 2026 году.

Библиографический список

1. Потлов, А. Ю. Определение механических свойств мягких биологических тканей в оптической когерентной томографии / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, С. Г. Проскурин // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2017 : сб. тр. XXX Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 6 – 8 декабря 2017 г. / под общ. ред. В. И. Жулева. – Рязань : ИП Коняхин А. В. (Book Jet), – 2017. – С. 286 – 289.

2. Фролов, С. В. Объектно-ориентированная декомпозиция информационной модели изделий медицинской техники / С. В. Фролов, М. С. Фролова // Ползуновский альманах. – 2016. – № 2. – С. 112 – 117.

3. Avsievich, T. I. Proskurin Spectral characteristics of shuttle self-oscillating endoplasmic motility in slime mold plasmodium / T. I. Avsievich, S. V. Frolov, S. G. Proskurin //Optics and Spectroscopy. – 2016. – V. 120, No. 1. – P. 70 – 75.

4. Avsievich, T. I. The Effect of Inhibitors of Cellular Respiration on SelfOscillating Motility in Plasmodium Physarum polycephalum / T. I. Avsievich, S. V. Frolov, S. G. Proskurin // Biophysics. – 2016. – V. 61, No. 1. – P. 59 – 66.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА ТАБЛЕТНИЦЫ С ГОЛОСОВЫМ ОПОВЕЩЕНИЕМ ДЛЯ СЛАБОВИДЯЩИХ

Е. П. Евстигнеева, Я. В. Долгов, Д. Е. Судаков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Elizavetaevst44@gmail.com)

Традиционные таблетницы, структурированные по принципу распределения лекарственных средств в соответствии с днями недели и временными интервалами суток, в своей основе ориентированы на зрительное восприятие информации. Данное обстоятельство существенно ограничивает их функциональную применимость для лиц с выраженными нарушениями зрительных функций. Пользователь с частичной или полной утратой зрения не способен достоверно контролировать факт приема медикаментов, а также корректно идентифицировать ячейки, соответствующие конкретным временным промежуткам. Несмотря на потенциальную эффективность тактильных ориентиров, остаются нерешенными задачи, связанные с формированием своевременных напоминаний и контролем последовательности приема препаратов.

Разработанный прототип интеллектуальной таблетницы демонстрирует высокий потенциал в области ассистивных технологий и может рассматриваться как эффективное средство повышения качества жизни лиц с ограниченными возможностями зрения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение функциональности устройства, включая интеграцию с мобильными приложениями и использование технологий искусственного интеллекта для персонализации режима терапии.



Рис. 1. Прототип проекта

Каждое отделение устройства оснащено рельефно-точечными тактильными маркировками, выполненными в соответствии с международными стандартами системы шрифта Брайля. Применение данной тактильной навигации обеспечивает возможность автономной идентификации ячеек пользователями с полной или частичной утратой зрительных функций посредством сенсорного восприятия. Использование рельефно-точечных обозначений способствует повышению эргономичности устройства, снижению вероятности ошибок при выборе необходимого отделения и обеспечивает более высокий уровень безопасности при соблюдении схемы медикаментозной терапии [1, 2].

Использование стандартных мобильных таймеров лишь частично решает данную проблему, поскольку такие устройства сигнализируют исключительно о наступлении заданного времени, не обеспечивая при этом содержательной информации о конкретном лекарственном средстве и требуемой дозировке. Отсутствие персонализированной обратной связи негативно сказывается на соблюдении режима фармакотерапии и может приводить к снижению эффективности лечения.

Библиографический список

1. Шнякина, Я. И. Методика подбора медицинского оборудования в соответствии со стандартом оснащения / Я. И. Шнякина, А. Р. Аветисян, Т. А. Фролова // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием ; Тамбов, 7 мая 2024 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – С. 311 – 313.

2. Лычагина, В. О. Медицинские технологии будущего и настоящего / В. О. Лычагина, Т. А. Фролова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. ; Тамбов, 24–25 октября 2023 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – Вып. 9. – С. 315–316.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ И ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ КОЖИ

О. А. Ивлиев, А. Ю. Потлов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Nostalgia01@yandex.ru)

Оптическая когерентная томография (ОКТ) – неинвазивный метод визуализации структуры биологических тканей с разрешающей способностью порядка 5…10 мкм. В основе метода лежит регистрация интенсивности обрат-

ного однократного и малократного рассеяния когерентного излучения видимого или ближнего инфракрасного диапазона оптическими неоднородностями с последующим построением объемного изображения, основанного на этих данных [1].

В ряде важных клинических случаев необходимо четкое понимание топографии поверхности сканируемого объекта. В связи с чем, целью авторских исследований является разработка соответствующих методов, алгоритмов и программных продуктов .

Для достижения поставленной цели была разработана модель построения топологических карт на основе данных ОКТ. В среде LabVIEW реализуется метод, основанный на преобразовании исходных двумерных данных с применением нескольких матриц конволюции и аппроксимацией. Формирование топологических карт представляет собой процесс нанесения линий уровня с использованием постеризации на обработанное исходное изображение с последующей проверкой условия замкнутости/разомкнутости [3]. При помощи интерфейса программного обеспечения, представленного на рис. 1, можно настроить необходимые параметры визуализации.

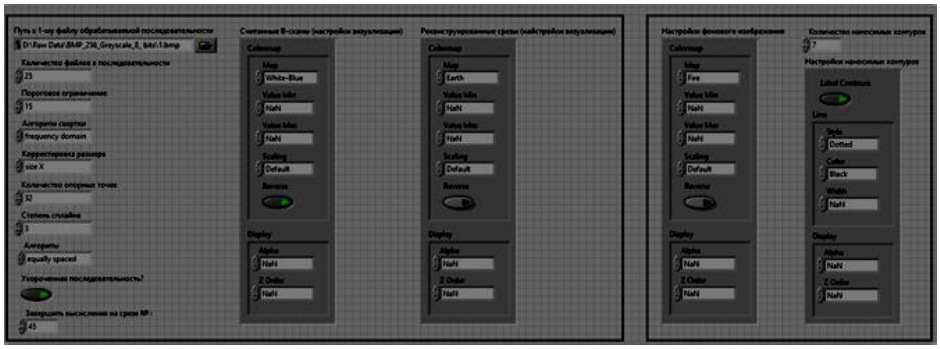
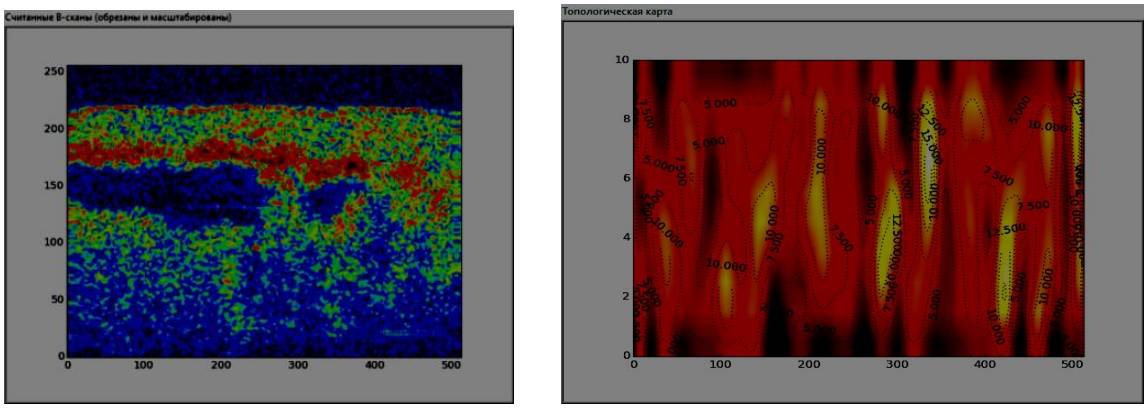


Рис. 1. Пользовательский интерфейс программного обеспечения

На рисунке 2 представлен пример топограммы мягких тканей кожных покровов человека, полученный из двумерных исходных ОКТ-данных.



а) *б*)

Рис. 2. Визуализация топограммы мягких тканей:
а – пример изображений обрабатываемой последовательности;
б – топограмма, построенная для всей последовательности

Область кожи, содержащая мозольный пузырь, была сканирована 25 раз при помощи волоконно-оптического зонда с шагом 30 микрон. Рисунок 2, *б* демонстрирует более высокую диагностическую значимость, чем отдельное структурное ОКТ-изображение (рис. 2, *а*).

Предложенный подход к представлению данных позволяет медицинскому персоналу эффективнее подбирать настройки косметологических лазеров, электрохирургического оборудования, либо концентрации агрессивных реагентов. Кроме того, данный вид отображения структуры кожи потенциально подходит для дальнейшей обработки с использованием сверточных нейронных сетей и технологий компьютерного зрения.

Библиографический список

1. Гуров, И. П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы / И. П. Гуров ; под ред. И. П. Гурова, С. А. Козлова // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2004. – С. 6 – 30.

2. Экспериментальная идентификация компонентов ОКТ-изображений здоровой тонкой кожи человека / Г. А. Петрова и др. // Российский журнал кожных и венерических болезней. – 2008. – № 6. – С. 53 – 58.

3. Фролов, С. В. Доплеровское картирование кровотока в мягких биологических тканях на основе обработки данных оптической когерентной томографии в режиме реального времени / С. В. Фролов, А. Ю. Потлов // Медицинская техника. – 2021. – № 2. – С.1 – 4.

СИСТЕМА ВЫДЕЛЕНИЯ И АННОТИРОВАНИЯ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ ДЛЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Г. П. Ильин, С. В. Фролов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: gregilyn@mail.ru)

Общий принцип обучения диагностической нейросети состоит в следующем: на начальном этапе в систему импортируется сформированная выборка изображений, относящаяся к определенной анатомической зоне в нормальном состоянии. Обученный классификатор определяет с определенной степенью уверенности, принадлежит ли новое исследуемое изображение к заранее определенным классам. На этапе общей классификации изображения разделяются на две категории: normal и pathologic. В случае отсутствия отклонений группы normal и tumor фактически совпадают, что способствует снижению сложности задачи автоматической классификации.

Далее выборка изображений проходит обработку с использованием алгоритма сегментации патологической области, основанного на пороговой фильтрации и детекторе границ Кэнни. Полученный паттерн достаточно точно отображает пораженную область (рис. 1). В результате такой обработки форми-

руется выборка патологических масок, каждая из которых определяется двумя лейблами: анатомическим классом изображения – brain и типом патологии – tumor_carcinoma.

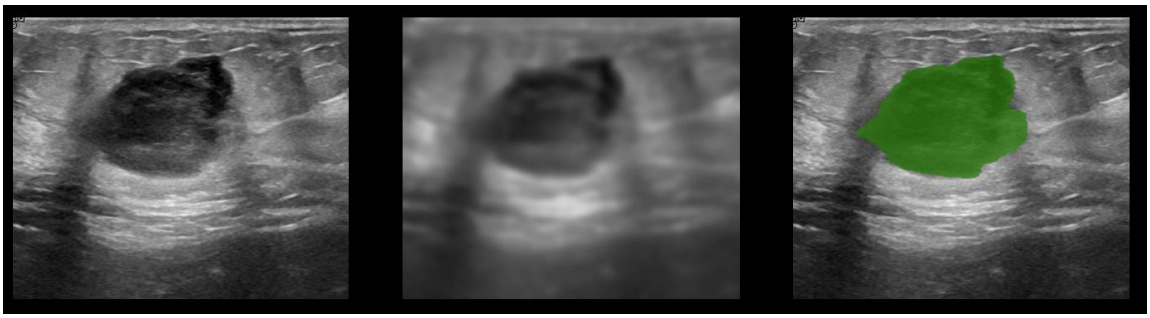


Рис. 1:
Слева: полученная бинарная маска
для патологической области на изображении УЗИ;
справа: исходное изображение и конечный результат выделения злокачественной опухоли

Эти операции изменяют значение пикселя, приравнивая его соответственно к минимальному или максимальному значению среди девяти соседних элементов в окне 3×3. При последующем преобразовании изображения в бинарную форму, что означает: пиксель получает значение 0, если хотя бы один из соседних пикселей равен нулю, и значение 1 – если среди них присутствует хотя бы один пиксель со значением 1.

Высокая точность выделения границ патологий позволяет применять сформированные маски в качестве ориентиров для лейблов классов, что значительно ускоряет процесс обучения диагностической нейронной сети за счет формирования выборок из заранее фильтрованных изображений различных патологий. Дополнительным преимуществом является уменьшенный объем масок по сравнению с исходными изображениями, что повышает эффективность работы с большими наборами данных.

Библиографический список

1. Сверточные нейронные сети в задаче классификации медицинских изображений / Л. И. Зеленина, Л. Э. Хаймина, Е. А. Деменкова и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 9.

2. Ильин, Г. П. Использование нейросетей в задаче обнаружения и классификации патологий на медицинских изображениях в рамках интеллектуальной диагностической системы / Г. П. Ильин, Д. Д. Окулов, В. В. Дубровин // Актуальные проблемы медицинской науки и образования (АПМНО-2023) : сб. ст. по материалам IX Междунар. науч. конф. – Пенза, 2023. – С. 186 – 189.

3. Эффективность алгоритмов машинного обучения и сверточной нейронной сети для обнаружения патологических изменений на магнитнорезонансных томограммах головного мозга / Ю. Д. Агафонова, А. В. Гайдель, П. М. Зельтер, А. В. Капишников // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 266 – 273.

ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ

Д. А. Истомин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: dim-istomin2017@yandex.ru)

Бытовые травмы, заболевания внутренних органов и сосудистые патологии по данным ВОЗ остаются одними из острых проблем в мире. Важнейшую роль в диагностике этих состояний играет томографическая диагностика. КТ эффективна для выявления переломов, травм внутренних органов, патологий легких (пневмония, туберкулез), опухолей, абсцессов, аневризм, тромбозов и ишемических поражений. МРТ лучше визуализирует мягкие ткани, нервную систему и суставы – помогает диагностировать инсульты, рассеянный склероз, грыжи позвоночника, повреждения связок, опухоли мозга и мягких тканей. ПЭТ/КТ незаменима в онкологии: выявляет первичные опухоли и метастазы, оценивает эффективность лечения. Современная томографическая диагностика предлагает решение: цифровые диагностические системы, высокоскоростные установки и фотолазерные технологии позволяют проводить лечение с минимальным дискомфортом для пациента и высокой точностью.

Современная система ПЭТ оборудования включает несколько ключевых компонентов: детекторный блок со сцинтилляционными кристаллами для регистрации гамма-квантов; кольцевую систему детекторов для 3D-сканирования; электронную систему обработки сигналов; систему подачи радиофармпрепаратов (РФП) с изотопами (фтор 18, углерод 11 и др.) ;интегрированный КТ модуль (в ПЭТ/КТ) для анатомической привязки данных; подвижный стол для пациента; программное обеспечение для реконструкции изображений и анализа метаболической активности (включая расчет SUV); систему управления с интерфейсом для настройки сканирования.

Основными мировыми производителями томографического оборудования являются: Siemens (Германия); АМИКО (Российская Федерация); Canon (Япония).

В качестве новейших разработок последних лет можно выделить – молекулярный ПЭТ/КТ сканер Siemens Biograph mCT 20 128, несущий в себе основой позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ) и компьютерную томографию для высокоточной диагностики онкологических, кардиологических, неврологических и ортопедических заболеваний, а также для планирования лучевой терапии. От компании АМИКО (Россия) можно выделить NewTom 7G XL – сверхмощный конусно-лучевой позитронно-эмиссионный томограф смешанной модели. Это усовершенствованная модель NewTom 5G с увеличенной областью сканирования и функцией съемки в динамике. От компании Canon можно отметить Canon Cartesion Prime – ПЭТ/КТ сканер от Canon Medical Systems Corporation, объединяющий технологию позитронно-эмиссионной (ПЭТ) как основу, и компьютерную (КТ) томографии в одном устройстве. Система построена на базе детектора SiPM PET и КТ модуля

Aquilion Prime, что обеспечивает высокое качество визуализации и оптимизацию рабочего процесса.

Современное томографическое оборудование обеспечивает высокую точность, снижение лучевой нагрузки в 5 – 10 раз, диагностику за одно посещение и минимальный дискомфорт, но требует больших затрат (2…6 млн руб.), регулярного обслуживания, калибровки и обучения персонала [1, 2].

В качестве перспектив развития томографического ПЭТ оборудования можно отметить использование искусственного интеллекта для автоматического анализа послойных изображений с точностью, превышающей человеческую, включая выделение подозрительных областей, опухолей и других патологий, а также применение ультразвуковых датчиков нового поколения для безболезненной диагностики заболеваний с минимальным введением радиофармпрепарата [3].

Библиографический список

1. Сантьяго, Дж. И. Позитронно-эмиссионная томография с компьютерной томографией / Дж. И. Сантьяго. – Переиздание. – Россия : Панфилова, 2023.

2. Радиофармпрепараты. Руководство по ПЭТ-КТ и ПЭТ-МРТ Калабрия / Ф. О. Скиллачи ; пер. с англ. ; под ред. А. Д. Каприна, П. В. Шегая, А. В. Леонтьева. – 2025. – № 4.

3. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

АППАРАТЫ УЗИ В СОВРЕМЕННОЙ МЕДИЦИНЕ

Д. М. Казьмин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: kazmindanik@gmail.com)

Самый распространенный вариант применения ультразвука – диагностические сканеры (УЗИ), используемые для визуализации внутренних структур и органов, получения данных об их расположении, форме, линейных размерах. В том числе УЗИ используется в акушерской практике, для подтверждения беременности, определения ее сроков, в зависимости от размера плода, уточнения пола ребенка, диагностики патологий. С помощью УЗИ проводят такую манипуляцию, как кордоцентез – инвазивный метод пренатальной диагностики, позволяющий с высокой точностью диагностировать все виды известных хромосомных болезней, ряд генных заболеваний, внутриутробные инфекции [1 – 3].

Современные УЗИ-аппараты становятся все более совершенными: повышается разрешающая способность датчиков, улучшаются алгоритмы обработки

сигналов, внедряются технологии искусственного интеллекта для автоматической интерпретации изображений. Производители активно работают над миниатюризацией оборудования – появляются портативные и даже карманные устройства, не уступающие стационарным моделям по качеству визуализации. Особое внимание уделяется специализированным режимам сканирования, таким как эластография и контрастная эхография, которые расширяют диагностические возможности метода.

Так, среди новейших моделей УЗИ-аппаратов можно выделить Mindray Resona R9 и Samsung Medison V7. Оба аппарата относятся к премиальному или экспертному классу и оснащены передовыми технологиями обработки изображений и автоматизации процессов.

Mindray Resona R9 – премиальный ультразвуковой аппарат экспертного класса, который выводит диагностику на новый уровень благодаря сочетанию передовых технологий и интеллектуальных функций. В основе работы устройствалежит платформа ZST+ (Zone Sonography Technology Plus): в отличие от традиционного построчного сканирования она использует зонный сбор данных. Это дает равномерное качество изображения по всей глубине исследования и ускоряет процесс диагностики. Например, главной отличительной чертой является ультрамикроангиография (UMA) с тремя режимами работы. Она позволяет визуализировать мельчайшие сосуды диаметром менее 100 микрон. Это повышает точность диагностики опухолей и заболеваний щитовидной железы, сокращая число необоснованных биопсий. УЗИ-аппарат Mindray Resona R9 ожидается к запуску в российских медицинских учреждениях в 2026 году. Некоторые медицинские учреждения, которые упоминаются как потенциальные пользователи Mindray Resona R9: ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Морозовская детская городская клиническая больница, НМИЦ «Онкологии им. Н. Н. Блохина» и др.

Ультразвуковая система Samsung V7 – это инновационный УЗИ аппарат, сочетающий передовые технологии и высокую производительность. Устройство предназначено для широкого спектра диагностических исследований, обеспечивая точность и комфорт в работе специалистов. Благодаря уникальным разработкам, таким как S-Vue Transducer Architecture и Smart 3D Imaging, аппарат позволяет получать детализированные изображения в режиме реального времени, что значительно повышает качество диагностики. Samsung V7 оснащен интеллектуальной системой обработки данных, которая автоматически оптимизирует настройки под конкретные условия обследования. Это сокращает время на подготовку и повышает точность результатов. Система поддерживает многопользовательские режимы, что делает ее универсальной для различных медицинских учреждений. Высокая скорость обработки данных и возможность интеграции с другими медицинскими системами делают Samsung V7 идеальным выбором для современных клиник. Этот аппарат активно используется в России. Некоторые медицинские учреждения, где используют это оборудование: клиника «Лаборатория Здоровья» в Мытищах, медицинский центр «Спектр Медицина».

Библиографический список

1. Интеграция медицинской техники в информационную систему лечебно-профилактического учреждения / С. В. Фролов, М. С. Фролова, И. А. Толстухин, В. Ю. Ошурков // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – № 3(53). – С. 68 – 80.

2. Куликов, Р. А. Разработка АРМ врача ультразвуковой диагностики / Р. А. Куликов, С. В. Фролов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Вып. 2, Т. I. – С. 162 – 165.

3. Фролов, С. В. Допплеровские методы исследования / С. В. Фролов, М. С. Фролова, Н. Ю. Никитина // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Вып. 5, Т. III. – С. 151 – 157.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

К. С. Карев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: kirillkarev.20071122@mail.ru)

Заболевания органов дыхания занимают одно из ведущих мест в структуре общей заболеваемости населения. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), хронические респираторные заболевания, такие как ХОБЛ и бронхиальная астма, ежегодно становятся причиной более 3 миллионов смертей в мире, что составляет около 5,4% от всех случаев летальности. Ранняя диагностика и мониторинг функционального состояния дыхательной системы являются критически важными для снижения инвалидизации пациентов и повышения эффективности лечения.

В этой связи особое значение приобретают приборы для измерения параметров дыхательной системы (спирометры, пневмотахометры, пульсоксиметры, капнографы). Потребность здравоохранения в точном, доступном и цифровом диагностическом оборудовании постоянно растет. Проблематика текущего состояния заключается в том, что значительная часть медицинских учреждений использует устаревшее оборудование, не позволяющее проводить длительный мониторинг в реальном времени, а также испытывает дефицит отечественных аппаратов, соответствующих современным мировым стандартам.

На мировом рынке приборов для респираторной диагностики лидирующие позиции занимают несколько ключевых компаний.

Среди мировых производителей выделяются:

– COSMED (Италия) – специализируется на кардиореспираторных системах, оборудовании для эргоспирометрии и портативных спирометрах высокого класса точности.

– Vyaire Medical (США) – один из крупнейших игроков, предлагающий полный спектр от спирометров до сложных систем респираторной терапии.

– CareFusion (часть BD, США) – известен широкой линейкой диагностических спирометров для первичного звена здравоохранения.

– Nihon Kohden (Япония) – лидер в области мониторинга пациентов, включая капнографию и мультипараметрические мониторы с респираторными каналами.

Отечественная индустрия представлена предприятиями:

– ООО «Нейрософт» (г. Иваново) – разрабатывает и производит компьютерные спирометры («Спиро-Спектр») и системы для функциональной диагностики.

– ООО «Тритон-Электроникс» (г. Екатеринбург) – выпускает пульсоксиметры и портативные мониторы дыхания.

– НПФ «Медиком МТД» (г. Таганрог) – предлагает решения в области холтеровского мониторирования ЭКГ и респираторных параметров.

Российские разработчики в последние годы активно занимаются импортозамещением портативных и компьютерных диагностических комплексов, однако в сегменте высокотехнологичных стационарных систем (эргоспирометрия, респираторная поддержка) доля импорта остается высокой. Активно разрабатываются системы на основе искусственного интеллекта и нейронных сетей, в том числе анализаторы дыхания нового поколения [1 – 3].

Библиографический список

1. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

2. Использование нейроконтроллера и электрохромного остекления в инкубаторах для новорожденных для адаптивной имитации смены дня и ночи / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова // Медицинская техника. – 2024. – № 4(346). – С. 14 – 16.

3. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФАНТОМОВ

Д. Ю. Ковалева, К. С. Савинова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: novo_dasha1990@mail.ru)

В последние годы технология трехмерной печати, также известная как аддитивное производство, совершила настоящий прорыв в различных отраслях, в том числе в медицинской сфере. Эта методика, основанная на послойном

нанесении материалов для создания трехмерных объектов, предоставила новые возможности для разработки и изготовления медицинских устройств, протезов, имплантатов, а также биологических тканей [1, 2].

К основным направлениям использования аддитивных технологий в медицине можно отнести хирургию и планирование операций, протезирование и имплантацию, обучение персонала, фармацевтику, тканевую инженерию и неонаталогию. Одним из наиболее перспективных направлений является создание медицинских фантомов в неонаталогии – области медицины, работающей с новорожденными, включая недоношенных детей с экстремально низкой массой тела.

Преимущества применения 3D-печати в неонатологии:

– низкая себестоимость изготовления. По сравнению с традиционными методами производства медицинских фантомов, аддитивные технологии требуют меньших затрат на расходные материалы и не нуждаются в дорогостоящей оснастке, что делает их доступными даже при ограниченном бюджете.

– высокая анатомическая точность. Модели, построенные на основе данных компьютерной томографии или магнитно-резонансной томографии реальных пациентов позволяют достоверно воспроизводить форму и взаимное расположение органов.

– калибровка и тестирование оборудования. Фантомы дают возможность настраивать ультразвуковые аппараты, а также оптимизировать параметры работы неонатальных инкубаторов и улучшать микроклимат внутри них.

– имитация физических свойств тканей. Благодаря использованию разных материалов и регулировке плотности печати удается подражать плотности костных структур, легочной паренхимы и мягких тканей. Например, PLA или ABS-пластик применяют для создания жесткого каркаса, сосудистых опор и литейных форм; фотополимерная печать (SLA) востребована там, где нужна высокая детализация, гладкая поверхность и точное воспроизведение мелких деталей; силикон благодаря эластичности и схожести с кожей при УЗИ часто используют для имитации мягких тканей.

– универсальность и доступность для малых лабораторий производственных мощностей.

Тем не менее, существует ряд ограничений методов. Для получения точных размеров и геометрии органов требуются КТ или МРТ-сканы реальных пациентов, однако эти медицинские данные относятся к закрытой информации и редко предоставляются для открытого использования.

Таким образом, развитие аддитивных подходов содействует повышению качества медицинской помощи, снижению рисков для пациентов и улучшению подготовки врачей. Для неонатологии это не просто техническая задача, а этическая необходимость, направленная на создание наилучших условий для выживания и нормального развития новорожденных. Особую значимость здесь приобретает дешевизна изготовления фантомов и возможность их производства силами небольших лабораторий [1, 2].

Библиографический список

1. Экспериментальная установка для исследования особенностей управления микроклиматом в неонатальных инкубаторах с использованием гидродинамического фантома новорожденного / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 52 – 59.

2. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОГО СИМУЛЯТОРА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ НЕЙРООНКОЛОГОВ НА ОСНОВЕ 3D-ПЕЧАТИ

Н. А. Колотей

Томский политехнический университет, Томск, Россия
(e-mail: nak78@)tpu.ru)

В современной нейрохирургии особое значение приобретает подготовка специалистов, способных выполнять сложные операции с высокой точностью. Традиционные методы обучения, основанные на теоретической подготовке и наблюдении за операциями, не всегда обеспечивают формирование необходимых практических навыков. В связи с этим активно развиваются технологии симуляционного обучения, в частности, с использованием аддитивного производства [1].

Целью данной работы является разработка физического симулятора для подготовки хирургов-нейроонкологов, основанного на использовании данных компьютерной томографии и технологий 3D-моделирования и печати, доступной, а время изготовления – минимальным.

Современные исследования показывают, что применение 3D-печати в нейрохирургии позволяет создавать анатомически точные модели головного мозга [1], включая опухоли и сосудистые структуры. Такие модели используются как для предоперационного планирования, так и для тренировки хирургических навыков [1, 2]. Основным преимуществом физических моделей по сравнению с цифровыми является возможность тактильного взаимодействия, что позволяет более точно оценивать пространственные характеристики и отрабатывать мануальные навыки.

Разрабатываемый симулятор должен удовлетворять ряду требований. Во-первых, он должен обладать высокой анатомической точностью (погрешность не более 1 мм). Во-вторых, необходимо обеспечить биомеханическое соответствие тканей: различные элементы модели (кость, мозг, опухоль) изго-

тавливаются из материалов с различной жесткостью. В-третьих, модель должна позволять выполнение основных хирургических манипуляций [3], таких как краниотомия. Также важным фактором является экономическая эффективность: стоимость модели должна оставаться

На текущий момент нами реализован базовый подход к созданию физического симулятора, включающий использование данных компьютерной томографии в формате DICOM, которые обрабатываются в программной среде 3D Slicer. С применением методов полуавтоматической и ручной сегментации нами выделены основные элементы модели: головной мозг, опухолевое образование, сосудистая сеть и костные структуры черепа. Это позволило сформировать анатомически корректные трехмерные модели, пригодные для последующей обработки и использования в симуляционном обучении.

Дальнейшая работа направлена на доработку полученных цифровых моделей и подготовку их к физической реализации. Нами выполнен экспорт моделей в среду Blender, где проведена их комплексная обработка, включающая устранение артефактов сегментации и сглаживание поверхностей. Для имитации биомеханических свойств тканей предложено использование материалов с различной жесткостью: для моделирования костных структур применяются жесткие фотополимеры или PLA-пластик, для имитации мягких тканей – силиконы различной плотности, а также эластомеры (например, силиконовые компаунды типа Ecoflex или Dragon Skin).

Заключительный этап разработки предполагает проведение валидации создаваемой модели. Оценка планируется с привлечением экспертов (нейрохирургов) по ряду критериев, включая анатомическую точность, реалистичность и функциональную пригодность симулятора. Ожидается, что результаты валидации позволят оценить применимость разработанного решения для повышения качества подготовки специалистов, сокращения времени обучения и снижения рисков при выполнении реальных операций. Таким образом, дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную проверку эффективности разработанной модели и обоснование возможности ее практического применения.

Библиографический список

1. Three-dimensional printing in neurosurgery: a review of current indications and applications and a basic methodology for creating a three-dimensional printed model for the neurosurgical practice / D. Vezirska et al. // Cureus. – 2022. – V. 14. – No. 12. – P. e33153.

2. The current application of 3D printing simulator in surgical training / Y. Jiang, et al. // Frontiers in Medicine. – 2024. – V. 11. – P. 1443024.

3. Development and validation of a 3-dimensionally printed craniotomy simulation model for under-resourced healthcare systems: a technical note / B. K. Hoglund et al. // Neurosurgery practice. – 2025. – V. 6, No. 4. – P. e000186.

ИМПЛАНТИРУЕМЫЕ БИОСТИМУЛЯТОРЫ

В. Д. Косякина, В. А. Фетисов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: nika68nice@mail.ru)

Сердечно-сосудистые и неврологические заболевания лидируют в структуре смертности. По данным ВОЗ, ежегодно от внезапной сердечной смерти умирает около 7 млн человек, причем значительная часть этих случаев предотвратима с помощью имплантируемых устройств. Ежегодно в мире около 1 млн человек нуждаются в установке кардиостимулятора. Биоэлектрическая медицина предлагает решение: имплантируемые биостимуляторы воздействуют слабыми импульсами на ткани, восстанавливая функции органов при неэффективности фармакотерапии.

Система биостимуляции включает три компонента: генератор импульсов, электроды, удлинитель.

Основными производителями являются: Medtronic (США); Boston Scientific (США); Abbott (США); Кардиоплант (Россия)

В качестве новейших разработок последних лет можно выделить биологический и саморастворяющийся кардиостимуляторы.

Основными их преимуществами являются: эффективность при фармакорезистентных состояниях, улучшение качества жизни, новые разработки исключают повторные операции.

Основными недостатками являются: высокая стоимость, риски инфекций, необходимость замены генератора (кроме новых моделей), биостимуляторы пока в стадии экспериментов.

В качестве перспектив развития можно отметить:

1. Биологические кардиостимуляторы – отказ от электроники и батарей.
2. Миниатюризация и биоразлагаемые материалы – устройства менее 4 мм, саморастворение.
3. Удаленный мониторинг – интеграция с облачными платформами.
4. Искусственный интеллект – прогнозирование аритмий, оптимизация терапии.
5. Расширение показаний – апноэ сна, хроническая боль.

Имплантируемые биостимуляторы – высокотехнологичные средства лечения. Наряду с мировыми лидерами (Medtronic, Boston Scientific) развиваются российские проекты («Кардиоплант», биостимулятор Центра Мешалкина). Прорывы 2024 – 2025 годов (биологические и саморастворяющиеся устройства) открывают новую эру в лечении сердечно-сосудистых заболеваний. Актуальна задача развития региональной инфраструктуры.

Библиографический список

1. Система поддержки принятия врачебных решений для ранней диагностики детей с дефектом межжелудочковой перегородки / С. В. Фролов, Д. Е. Судаков, А. А. Коробов, Д. Г. Старых // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2026. – Т. 29, № 1. – С. 18 – 23.

2. Фролов, С. В. Система поддержки принятия врачебных решений в кардиологии на основе цифрового двойника сердечно-сосудистой системы / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Н. Ветров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 1(40). – С. 3–4.

РАЗРАБОТКА НОСИМОГО УСТРОЙСТВА С ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ СЛУХА

А. В. Кузнецова, И. Э. Петров, С. В. Фролов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: irinka.dro@yandex.ru)

В настоящей работе представлено описание прототипа умных очков для людей с нарушениями слуха, который обеспечивает расшифровку речи в реальном времени с выводом текста на встроенный OLED-дисплей. Актуальность разработки обусловлена отсутствием на отечественном рынке российских производителей умных очков, которые предназначались бы для инвалидов по слуху. Стоит отметить, что в России проживает более 10 млн человек с нарушением слуха.

На данный момент разрабатываются две архитектурные версии: с облачным и офлайн-распознаванием речи.

Облачный прототип (рис. 1) базируется на использовании микроконтроллера ESP32-S2, модуле Wi-Fi, четырехканальной микрофонной системе MAX9814 и сервисе Yandex SpeechKit API. Речь передается в облако, распознается, текст возвращается на дисплей. Преимущества SpeechKit: низкая стоимость аппаратной части, ускорение процесса прототипирования, высокое качество распознавания за счет готовых нейросетевых моделей. Ограничения: зависимость от интернета, латентность, эксплуатационные расходы. Устройство оптимально для стационарных условий (учебные заведения, рабочие места).



Рис. 1. Прототип умных очков с облачным распознаванием

Сейчас ведется работа над созданием эргономичной версии умных очков с заменой текущих микроконтроллера на Seeed Studio XIAO ESP32S3 и микрофонного усилителя на INMP44.

Вторая версия устройства реализует полностью офлайн-распознавание на основе Raspberry Pi 5 с использованием открытых библиотек Vosk и Whisper. Аудиопоток обрабатывается локально, что обеспечивает автономность, конфиденциальность и отсутствие абонентской платы. Ограничения: более высокое энергопотребление и цена платформы. Vosk позиционирует себя как легкая модель обучения нейросетей для русского языка, а Whisper востребован за счет повышенной точности.

На текущий момент собран и отлажен прототип с облачным распознаванием на ESP32; ведется разработка офлайн-версии на Raspberry Pi 5. Оба варианта закрывают разные пользовательские сценарии: первый для массового доступного устройства при наличии стабильной сети, второй для более автономной работы и чувствительных к приватности ситуаций [1, 2].

Первый прототип умных очков для инвалидов по слуху занял 1 место на всероссийском конкурсе акселерационной программы «ЦифРаПром» (ИТ-трек, декабрь 2025), получил приз ректора на 100 тыс. рублей, стал финалистом конкурса «Технологии для здоровья человека» и прошел в финал Фестиваля технологических проектов НИУ ВШЭ «HSE FEST 2026», а также получил положительный отклик от экспертов на международных конференциях «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2025), «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» (Тамбов, 2025) и др. Были разработаны и зарегистрированы ФИПС 2 программы для ЭВМ (свидетельства № 2026613378, № 2026613750).

Библиографический список

1. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202661337 Российская Федерация. Программный комплекс распознавания устной речи в реальном времени с использованием потоковой передачи аудиоданных и нейросетевого анализа / И. Э. Петров, А. В. Кузнецова, Т. А. Фролова ; правообл. ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» ; заявл. 03.02.2026 ; опубл. 05.02.2026 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ.

2. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026613750 Российская Федерация. Визуализация речевых сигналов человека методом последовательного преобразования аудиопотока в текстовые данные с отображением на графическом интерфейсе / И. Э. Петров, А. В. Кузнецова, Т. А. Фролова ; правообл. ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» ; заявл. 03.02.2026 ; опубл. 10.02.2026 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СФИГМОРИТМОГРАФИИ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

А. В. Кузнецова, С. Г. Проскурин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: irinka.dro@yandex.ru)

Современные автоматизированные приборы и прикроватные мониторы регистрируют R-R ритмограмму, но ограничиваются бинарной оценкой аритмии («есть/нет»). Отсутствие количественной оценки вариабельности сердечного ритма (ВСР) снижает диагностическую ценность таких приборов для скрининга и определения эффективности терапии.

Целью настоящей работы является разработка метода и прототипа сфигморитмографа для комплексного количественного исследования ВСР на основе анализа последовательности пульсовых интервалов.

Текущее исследование основывается на анализе вариабельности сердечного ритма по стандартам Task Force [1]. Регистрация пульсового сигнала выполнена с помощью фотоплетизмографического датчика и осциллометрического сигнала автоматического тонометра. Разработано программное обеспечение на C++ (Arduino IDE) с алгоритмами: автоматическая калибровка порога (5 с), детекция пульсовых волн с временным ограничением 250 мс, расчет ЧСС, процента аритмии (ПА = $SDNN/RR_{ср}\times100\%$), показателей pNN30/pNN40/pNN50 [2, 3]. Проведены сравнительные измерения с ЭКГ (диагностическая система «Валента») на 35 добровольцах.

Коэффициент корреляции с ЭКГ составил: для ЧСС до 0,96, для процента аритмии до 0,88, для pNN50 до 0,85. Погрешность определения ЧСС не превысила 3 уд/мин. Разработанный прототип (рис. 1) обеспечивает расчет количественных параметров за 15…30 с измерения.



а) *б*)

Рис. 1. Программно-аппаратный модуль для количественного определения основных параметров вариабельности сердечного ритма, измерения частоты сердечных сокращений и процента аритмии:
а – без индикатора аритмии, процент = 3…8%; *б* – с индикатором, аритмия = 12…20%

Предложенный прототип сфигморитмографа позволяет впервые реализовать в доступном устройстве количественную оценку аритмии синусового узла и других параметров вариабельности сердечного ритма –pNN50/pNN40/pNN30,

SDNN, RMSSD, HRV, ЧСС без использования электродов. Метод пригоден для домашнего и прикроватного мониторинга, оценки эффективности антиаритмической терапии и скрининговых исследований.

Разработанное устройство прошло апробацию на всероссийской конференции «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» (2025), получило призовое место, а также получило положительный отклик от экспертов на международных конференциях «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2025), «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» (Тамбов, 2024) и др. Были разработаны и зарегистрированы ФИПС 2 программы для ЭВМ (свидетельства № 2025687482, № 2026614209).

Библиографический список

1. Baevsky, R. M. Heart rate variability analysis: physiological foundations and main methods / R. M. Baevsky, A. G. Chernikova // Cardiometry. – 2017. – No. 10. – P. 66 – 76.

2. Свид. госрегистрации ПО ФИПС РФ, № 2025687482. Количественное определение характеристик вариабельности сердечного ритма человека / А. Р. Аветисян, А. В. Кузнецова, С. Г. Проскурин ; 10.10.2025.

3. Свид. госрегистрации ПО ФИПС РФ, № 2026614209. Количественное определение синусовой аритмии человека методом сфигморитмографии / А. Д. Филиппов, А. В. Кузнецова, С. Г. Проскурин ; 13.02.2026.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ОТСЛЕЖИВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ АКТУАЛЬНОГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ КАТЕТЕРА ЭНДОСКОПИЧЕСКОГО ЗОНДА

С. Г. Леньшин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Stas.Lenshin@mail.ru)

Гибкий зонд эндоскопа в современных эндоскопических исследованиях ориентируется в пространстве по видеосигналам с камеры. Это приводит к фундаментальным ограничениям: невозможность картографирования осмотренных участков, неточная привязка выявленных патологий. Предлагается возможность не использовать рентгеноскопию, как метод контроля пространственного положения в эндоскопических исследованиях. Контроль положения гибкого зонда реализуется путем интеграции в дистальный конец зонда миниатюрного инерциального измерительного модуля (МЭМС) [1]. Предполагаемая структурная схема проектируемого устройства представлена на рис. 1.

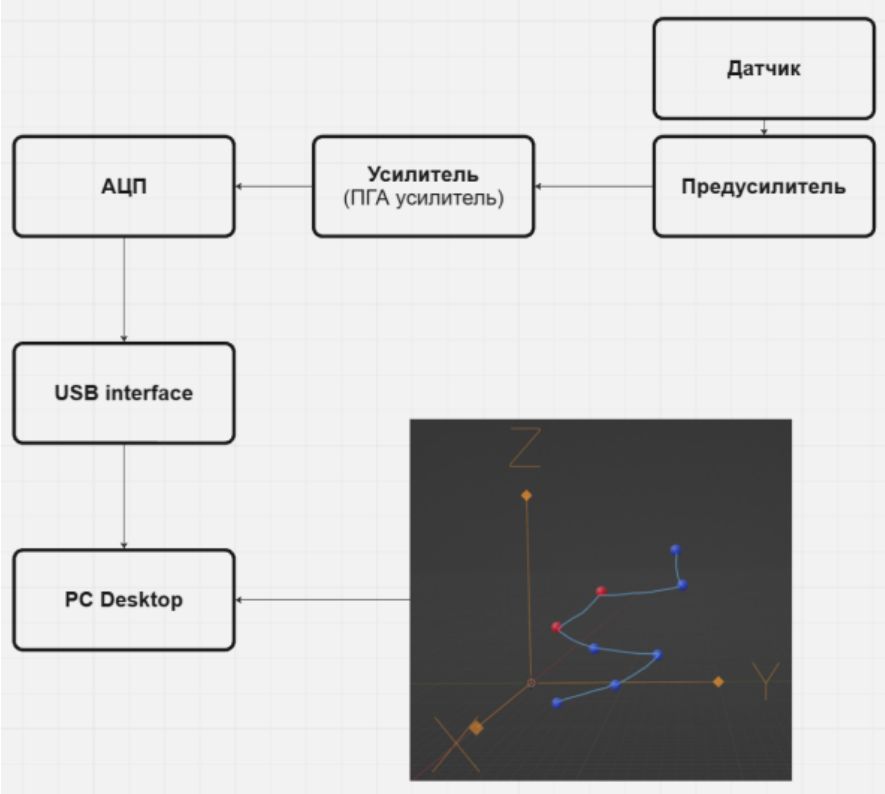


Рис. 1. Структурная схема проектируемой модели

В отличие от лазерных (или оптических) систем позиционирования, микроэлектромеханические датчики не требуют прямой видимости на объект и наличия неоднородностей на поверхности для отражения луча. МЭМС-акселерометры и гироскопы регистрируют собственные кинематические параметры движения (ускорения и угловые скорости) [2], что делает их полностью автономными и идеально подходящими для работы в практически однородной внутренней среде организма.

Для минимизации помех, наводимых длинным кабелем эндоскопа, предлагается размещать малошумящий предусилитель в непосредственной близости от датчика и передавать уже усиленный сигнал по экранированной линии. Ключевые схемотехнические решения включают:

– стабилизированное питание (LDO-регулятор);
– развязку цепей питания с помощью декаплинговых конденсаторов;
– экранирование линии связи.

Оцифровка сигнала используется АЦП последовательного приближения (SAR) в пропорциональном (ratiometric) режиме, при котором датчик и АЦП питаются от одного опорного напряжения. Это позволяет практически полностью скомпенсировать дрейфы и шумы по питанию, что критически важно для точных долговременных измерений [3].

Переход из локальной системы координат (СК), связанной с зондом, в глобальную СК (связанную с пациентом), в программе обработки реализуются аффинные преобразования с использованием однородных координат [3]. «Глобальные координаты = Поворот * Локальные координаты + Смещение». Базовое преобразование описывается формулой:

$$P_global = R \cdot P_local + T. \quad (1)$$

Разработка представляет собой замкнутый цикл: от теоретического анализа и создания математической модели → через проектирование и сборку экспериментального образца аппаратуры → к разработке специализированного программного обеспечения для обработки и 3D-визуализации.

Библиографический список

1. Фомин, С. В. Методы трехмерной реконструкции органов по данным эндоскопического осмотра / С. В. Фомин, Д. А. Ефимов // Вестник новых медицинских технологий. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 47 – 54.

2. Кузнецов, А. А. Использование микроэлектромеханических систем (МЭМС) в медицинских диагностических приборах / А. А. Кузнецов, П. И. Лебедев // Биомедицинская техника. – 2017. – Т. 51, № 5. – С. 25 – 31.

3. Дубровин, В. В. Аппаратно-программные средства повышения точности медицинских приборов на основе нейронных сетей / В. В. Дубровин, И. С. Рязанов, О. О. Голубятников // Математические методы в технике и технологиях. – Т. 27, № 3. – 2014. – С. 131–132.

РАЗРАБОТКА НОСИМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОСАНКИ С АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Д. В. Лобач

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: izmaq@mail.ru)

Нарушения осанки являются одной из наиболее распространенных проблем опорно-двигательного аппарата. Согласно данным ВОЗ, до 80% школьников и студентов имеют отклонения в формировании правильной осанки [1]. Длительная работа за компьютером и отсутствие контроля за положением тела приводят к развитию хронической сутулости. Существующие на рынке устройства для коррекции осанки имеют высокую стоимость (от 5000 руб.) и не всегда доступны массовому потребителю [2].

Целью данной работы является разработка доступного носимого устройства для коррекции осанки, использующего акустическую обратную связь.

Устройство представляет собой носимый гаджет, крепящийся на спину пользователя. В его основе лежит микроконтроллер Arduino Nano, инерциальный датчик MPU6050 (акселерометр + гироскоп) и пассивный зуммер. Принцип работы основан на непрерывном измерении угла наклона корпуса. Для получения точного значения угла применяется комплементарный фильтр, объединяющий данные с обоих датчиков [3].

Предложенное решение имеет потенциал для массового использования благодаря низкой себестоимости компонентов и может служить альтернативой дорогостоящим коммерческим аналогам.

1. Используемы компоненты

№	Количество	Название элемента
1	1 шт.	Микроконтроллер Arduini Nano
2	1 шт.	Датчик MPU6050
3	1 шт.	Зуммер (активный)
4	1 шт.	Кнопка DIP 2PIN
5	1 шт.	Батарея Li-ion 18500
6	1 шт.	Транзистор 100Ω
7	1 шт.	Тумблер KCD11
8	1 шт.	Повышающий DC-DC преобразователь
9	1 шт.	Батарейный отсек

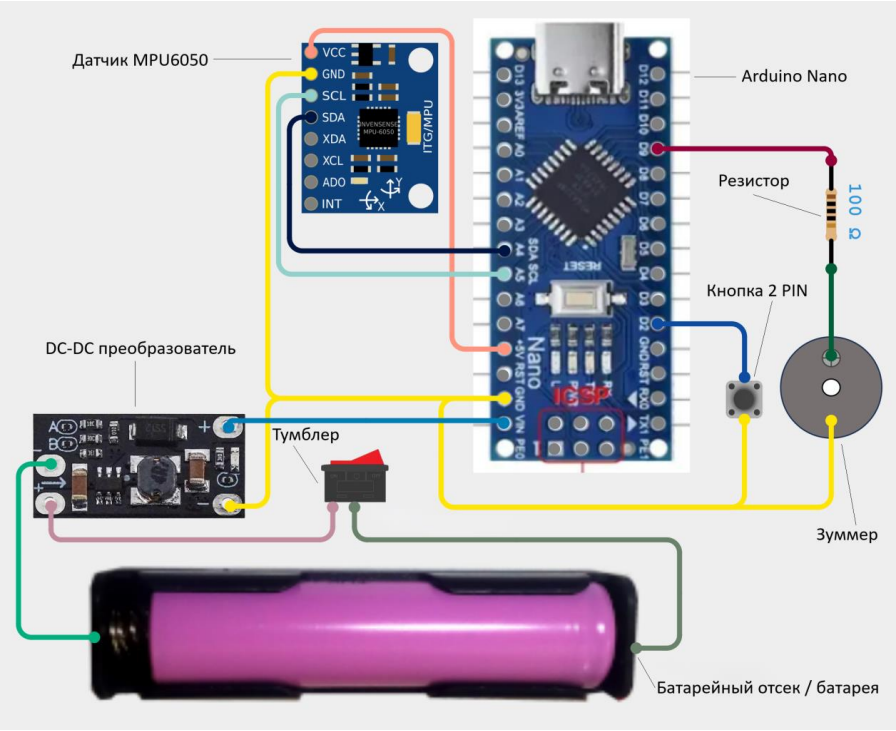


Рис. 1. Электрическая схема устройства



Рис. 2. Структурная схема устройства

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕИНВАЗИВНОГО МОНИТОРИНГА СНА И ФИЗИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕБЕНКА НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. А. Любавина, А. Д. Филиппов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: milenaliubavina@mail.ru)

Современные сенсорные технологии позволяют создавать интеллектуальные системы для неинвазивного контроля состояния здоровья детей грудного возраста [1 – 3]. В работе представлен программно-аппаратный комплекс для мониторинга сна и физического развития младенца, объединяющий анализ двигательной активности, акустический контроль и оценку антропометрических параметров. Актуальность решения продиктована потребностью в повышении безопасности ребенка во время сна и в раннем выявлении отклонений в росте и весе для своевременной коррекции.

Аппаратная часть системы базируется на модуле, встраиваемом в матрас детской кроватки. Устройство включает аналоговый микрофон KY-037 с адаптивной подстройкой порога срабатывания под фоновый шум, а также датчик движения MPU6050, откалиброванный под специфику плача младенца. Обработку данных и передачу по беспроводному каналу обеспечивает микроконтроллер NodeMCU с ядром ESP8266.

Программное обеспечение фиксирует моменты засыпания и пробуждения, анализируя превышение пороговых значений движения и звука в диапазоне частот детского плача (200…600 Гц). Система накапливает статистику общей продолжительности сна, подсчитывает число и длительность ночных пробуждений, а также визуализирует данные в виде суточных и недельных отчетов с графиками распределения периодов покоя и бодрствования.

Для определения гармоничности развития используются центильные таблицы, которые показывают распределение веса и роста среди детей определенного возраста и пола. Нормой принято считать показатели, попадающие в интервал между 25 и 75 перцентилями. Отклонение за эти границы может свидетельствовать о нарушениях физического развития ребенка.

Для полноценного анализа необходимо отслеживать динамику показателей на протяжении длительного времени, однако ручная фиксация результатов каждого измерения и последующее сравнение с центильными таблицами могут быть трудоемкими, а также появляется высокая вероятность появления ошибок. Для решения этой проблемы разработан программный комплекс, состоящий из двух модулей.

Первый модуль обеспечивает автоматизированный сбор антропометрических данных с детских электронных весов. Происходит прием закодированного сигнала через последовательный интерфейс, его расшифровка, проверка на допустимые значения и сохранение результатов в текстовый файл с именем, в котором записаны дата измерения и идентификатор ребенка.

Второй модуль выполняет анализ накопленных за определенный период данных. На основе сохраненных файлов рассчитывается динамика изменения веса и роста, после чего полученные показатели сравниваются с центильными нормами для соответствующего возраста и пола. Результатом анализа является заключение о соответствии развития ребенка норме либо выявленных отклонениях.

Разработанный программный комплекс позволяет автоматизировать процесс мониторинга физического развития и сна ребенка: от сбора исходных данных до получения аналитического заключения.

Библиографический список

1. Фролова, Т. А. Проектирование биомедицинских информационных систем / Т. А. Фролова, А. Н. Ряшенцева // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов : Изд-во Першина Р.В., 2019. – С 419 – 421.

2. Конструирование приложения для молодых матерей / Т. А. Фролова, Е. П. Евстигнеева, Е. В. Сеченева, Н. Р. Моргунов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы X Междунар. науч.-техн. конф. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – С. 349 – 351.

3. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ СНА И НЕОБХОДИМОСТЬ ЕГО МОНИТОРИНГА В МЛАДЕНЧЕСКОМ ВОЗРАСТЕ

М. А. Любавина, А. Д. Филиппов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: milenaliubavina@mail.ru)

Сон младенца представляет собой фундаментальный физиологический процесс, обеспечивающий гармоничное развитие всех систем организма в первый год жизни. В этот период у ребенка формируются циркадные ритмы, созревают нейронные сети, синтезируется соматотропный гормон, стимулиру-

ющий линейный рост и увеличение массы тела. От продолжительности, непрерывности и глубины сна напрямую зависит не только физическое, но и психоэмоциональное здоровье ребенка. Дефицит сна или его фрагментация приводят к повышению кортизола, снижению иммунной защиты, задержке темпов прибавки веса и роста и повышенной возбудимости или, напротив, апатии в периоды бодрствования [1 – 5].

Особую значимость приобретает безопасность ребенка во время сна. Младенцы неспособны самостоятельно изменить неудобное или опасное положение тела, а их крик является единственным сигналом стресса. Систематическое наблюдение за двигательной активностью и акустическими проявлениями позволяет своевременно зафиксировать пробуждения, связанные с дискомфортом, голодом или нарушением дыхания. Вид подобного устройства представлен на рис. 1. Раннее выявление частых ночных пробуждений, слишком коротких или патологически длительных эпизодов сна дает возможность врачу скорректировать режим дня, условия засыпания, характер вскармливания и при необходимости провести дополнительное обследование.



Рис. 1. Внешний вид устройства

Кроме того, существует тесная взаимосвязь между качеством сна и физическим развитием. При регулярном измерении веса и роста, а также сопоставлении полученных данных с центильными таблицами (где нормой приняты показатели в диапазоне от 25-го до 75-го перцентиля) объективно оценивается гармоничность развития. Отклонение за эти границы может быть маркером как алиментарных проблем, так и хронического недосыпания, которое нарушает метаболическую регуляцию.

Таким образом, непрерывный мониторинг сна младенца является необходимым инструментом ранней диагностики, позволяющий своевременно выявить отклонения и обеспечить полноценное развитие ребенка без риска формирования стойких нарушений в будущем.

Библиографический список

1. Приложение для учета и мониторинга сна младенцев / М. А. Любавина, Н. Р. Журавлев, Е. П. Евстигнеева, Т. А. Фролова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 2-х ч., Гомель, 24–25 апреля 2025 года. – Гомель : Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, 2025. – С. 175 – 178.
2. Участковый педиатр: Справочное руководство / М. Ф. Рзянкина, В. П. Молочный, В. Г. Дьяченко, Е. Н. Андрюшкина. – Ростов н/Д : Феникс, 2005. – С. 313.
3. Конструирование приложения для молодых матерей / Т. А. Фролова, Е. П. Евстигнеева, Е. В. Сеченева, Н. Р. Моргунов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – С. 349 – 351.
4. Любавина, М. А. Особенности и нарушения сна у детей / М. А. Любавина, Т. А. Фролова // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной «Дню радио и связи» и 80-летию победы в Великой Отечественной войне ; Тамбов, 7 мая 2025 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2025. – С. 245–246.
5. Любавина, М. А. Система сигнализации критических режимов неонатального инкубатора / М. А. Любавина, Т. А. Фролова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. ; Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – С. 338–339.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ПЕРСПЕКТИВЫ И АНАЛИЗ ИННОВАЦИОННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ БОЛЬНИЦ

У. Мадмарова, М. Нурмухаммедова

Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
(e-mail: muruvvatxonnurmuhammadovva7@gmail.com)

Новые технологии делают процессы лечения более эффективными, быстрыми и точными. Эти технологии не только улучшают качество медицинской помощи, но и помогают спасать жизни пациентов, повышать эффективность лечения и оптимизировать работу больниц.

1. Электронные медицинские карты (ЭМК). ЭМК – это система, позволяющая пациентам хранить свою медицинскую историю, информацию о лечении и другие важные сведения в цифровом виде.

2. Искусственный интеллект и машинное обучение (ИИ и МО). Технологии искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) используются для автоматизации и оптимизации медицинской диагностики и лечения. Эти технологии помогают анализировать большие объемы медицинских данных и получать быстрые и точные результаты. Преимущество этой технологии является в том, что искусственный интеллект используется для анализа медицинских изображений (например, рентгеновских снимков, МРТ, КТ), изучения истории болезни пациента и предложения новых методов лечения. Алгоритмы машинного обучения помогают врачам диагностировать заболевания пациентов.

Новые технологии: алгоритмы глубокого обучения позволяют более точно анализировать медицинские изображения, что повышает точность диагностики [1].

3. Телемедицина и дистанционная медицинская помощь. Телемедицина – это система оказания медицинской помощи пациентам дистанционно, позволяющая осуществлять прямую связь между врачом и пациентом. Эта технология позволяет проводить дистанционную диагностику, консультации и мониторинг состояния пациента. Телемедицина может ускорить оказание медицинских услуг, решить проблему нехватки медицинской помощи в отдаленных районах и сэкономить время пациентов. Такие услуги также могут помочь в получении неотложной медицинской помощи в отдаленных местах. Она применяет новые технологии: с помощью систем видеоконференцсвязи и мобильных приложений пациенты могут напрямую общаться с врачами, получать результаты диагностики и рекомендации по лечению.

4. 3D-печать и медицинские приборы. 3D-печать в медицине позволяет создавать имплантаты, протезы и другие медицинские изделия точных форм и размеров. Эта технология значительно ускоряет производство медицинских изделий и помогает адаптировать их к индивидуальным потребностям. 3D-печать позволяет создавать протезы или имплантаты, адаптированные к конкретным потребностям пациента. Это, в свою очередь, повышает эффективность процесса лечения и улучшает качество жизни пациентов. С развитием технологии 3D-печати открываются возможности для более точного и безопасного проведения медицинских операций.

5. Робототехника и хирургия. Робототехника делает хирургические процедуры более точными и безопасными. Роботизированные хирурги могут проводить операции с высокой точностью и через небольшие разрезы. Такие роботы также сокращают время восстановления пациентов и снижают риск осложнений. Роботизированные хирургические системы позволяют использо-

вать передовые технологии в реабилитации пациентов и послеоперационном уходе, такие как роботизированная хирургическая система Da Vinci и другие передовые хирургические роботы.

6. Генетическая диагностика и медицина. Генетическая диагностика помогает предотвращать и лечить заболевания, изучая генетический состав пациентов. Эти технологии используются для разработки индивидуального плана лечения на основе геномной информации. Генетическая диагностика изучает вероятность развития заболеваний путем выявления генетических факторов пациента. Эта технология помогает обеспечить персонализированную медицинскую помощь и позволяет разрабатывать специфические методы лечения. Новые технологии: Генетическое редактирование проводится с использованием технологии CRISPR, что в будущем откроет новые возможности для лечения генетических заболеваний.

7. Интернет вещей (IoT) и мониторинг состояния пациентов. Технологии Интернета вещей (IoT) могут использоваться для непрерывного мониторинга состояния пациентов. С помощью этих технологий можно в режиме реального времени отслеживать такие параметры, как частота сердечных сокращений, артериальное давление и состояние дыхания пациента.

Инновационные медицинские технологии для больниц помогают улучшить качество медицинской помощи и повысить эффективность ухода за пациентами. Новые технологии, такие как электронные медицинские карты, искусственный интеллект, телемедицина, робототехника, генетическая диагностика и Интернет вещей, еще больше повышают эффективность работы больниц. Эти технологии не только ускоряют оказание медицинской помощи, но и улучшают процесс выздоровления и обеспечивают безопасность пациентов.

Технологии искусственного интеллекта позволяют врачам ставить диагнозы с высокой точностью. С помощью искусственного интеллекта заболевания можно выявлять на ранней стадии, что повышает эффективность лечения. Это помогает уменьшить количество ошибок при распознавании и анализе медицинских изображений.

Библиографический список

1. Фролова, М. С. Оптимальный выбор изделия медицинской техники с использованием информационных систем в здравоохранении / М. С. Фролова, С. В. Фролов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 553 – 561.

ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ В МЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ

Н. Ю. Мамасодикова, Ш. А. Мамазойитов

Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
(e-mail: nodiramamasodikova@gmail.com; Sheralim179@gmail.com)

В эпоху стремительного развития современной биомедицины интеграция интеллектуальных датчиков и Интернета вещей (IoT) коренным образом меняет технологическую основу отрасли. Сегодня медицинская диагностика и генетические исследования требуют не только точности, но и сбора данных в режиме реального времени и дистанционного анализа. Интеллектуальные датчики стали не просто измерительными приборами, а сложными системами, способными к первичной обработке сигналов и их оцифровке [1, 2].

В здравоохранении «Интернет вещей» (IoT) обозначает сеть подключенных устройств, датчиков и приборов, которые собирают, передают и анализируют данные о здоровье пациентов. Носимые фитнес-трекеры, инновационные медицинские устройства, больничное оборудование и даже имплантаты – это лишь несколько примеров устройств IoT, используемых в здравоохранении. IoT в здравоохранении может: удаленно отслеживать состояние пациентов, контролировать медицинское оборудование в режиме реального времени и улучшать коммуникацию между пациентами и медицинскими работниками. IoT в здравоохранении может непрерывно отслеживать показатели здоровья пациентов. Он также может помочь выявлять потенциальные проблемы со здоровьем на ранних стадиях. Эти устройства IoT могут выявлять риски до того, как они станут серьезными. Это позволяет медицинским работникам улучшать результаты лечения пациентов и принимать необходимые меры. Устройства IoT также могут автоматизировать рутинные задачи и предоставлять уведомления в режиме реального времени. Это позволяет персоналу больницы сосредоточиться на более важных задачах по уходу за пациентами. Таким образом, высокая скорость и эффективность могут повысить общее качество ухода за пациентами и их удовлетворенность.

Система Интернета вещей обычно состоит из четырех основных уровней:

1. Сенсорный и аппаратный уровень – это самая нижняя часть системы Интернета вещей, отвечающая за сбор данных из физической среды. В секторе здравоохранения этот уровень включает датчики, измеряющие частоту сердечных сокращений, артериальное давление, температуру тела, частоту дыхания, уровень глюкозы и уровень насыщения крови кислородом. Датчики передают измеренные аналоговые или цифровые сигналы на микроконтроллеры для первоначальной обработки.

2. Передача данных, т.е. коммуникационный уровень, обеспечивает передачу данных, полученных от датчиков, по сети на центральный сервер или облачные платформы. К широко используемым в здравоохранении коммуникационным технологиям относятся Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT и сотовые сети (4G/5G). При выборе коммуникационной

технологии важны энергопотребление, дальность передачи и безопасность данных.

3. Слой обработки и хранения данных: на этом уровне собранные данные обрабатываются и хранятся на серверах или в облачных вычислительных системах. Современные системы IoT используют технологии больших данных и искусственного интеллекта для обработки больших объемов данных. В здравоохранении этот слой позволяет осуществлять раннюю диагностику, прогнозирование и оптимизацию процесса лечения заболеваний.

4. Слой приложений и пользовательского интерфейса. Этот слой включает программное обеспечение, разработанное для медицинских работников и пациентов. С помощью мобильных приложений, веб-платформ и панелей мониторинга пользователи могут отслеживать, анализировать и принимать решения по медицинским показателям в режиме реального времени.

В будущем возможности Интернета вещей (IoT) и интеллектуальных датчиков в мониторинге состояния пациентов будут расширяться еще больше. Датчики в сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта (ИИ) предложат проактивные подходы к профилактике заболеваний, более глубоко анализируя собранные данные. Генетические данные пациента, образ жизни и физиологические данные, полученные в режиме реального времени, могут быть объединены для создания индивидуальных медицинских программ для каждого пациента. Такие системы помогут заранее предсказать развитие заболевания и принять необходимые меры для его предотвращения. Системы мониторинга, интегрированные с технологиями виртуальной и дополненной реальности (VR/AR), позволят врачам более детально и наглядно наблюдать за состоянием пациента, что улучшит процессы диагностики и лечения. Такие технологии послужат повышению качества и комплексности дистанционной медицинской помощи (телемедицины), позволяя оказывать высококачественную медицинскую помощь даже пациентам в самых отдаленных регионах мира. Вкратце, Интернет вещей (IoT) и интеллектуальные датчики – это будущее мониторинга состояния пациентов и важный шаг на пути к персонализированной, проактивной и эффективной медицине. Развитие этих технологий внесет значительный вклад в поддержание здоровья человека и продление жизни.

Библиографический список

1. Фролова, М. С. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / М. С. Фролова, С. В. Фролов, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Специальный выпуск 52. – С. 106 – 111.

2. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ВЕНОСКОПА НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФРАКРАСНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н. Р. Моргунов, Е. В. Сеченева

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: morgunov68ru@gmail.com; Ekaterina48_48_secheneva@mail.ru)

В современной медицинской практике одной из наиболее актуальных задач является поиск вен при выполнении инъекций, установке катетеров, заборе крови. Особенно сложной эта процедура становится у пациентов со слабо заметной сосудистой системой, при недостатке влаги в организме, избыточной массе тела или глубоком расположении вен. В таких ситуациях медицинскому персоналу необходимо больше времени для поиска подходящего сосуда, что повышает вероятность ошибок, повторных проколов и приносит неудобства пациенту.

Для решения данной проблемы применяются веноскопы – это портативные медицинские приборы для визуализации вен на коже в реальном времени, использующие инфракрасное излучение. Их работа основана на использовании инфракрасного излучения, которое приникает в ткани организма. Гемоглобин, содержащийся в крови, активно поглощает инфракрасный свет, тогда как окружающие ткани отражают его в большей степени. Благодаря этому вены на изображении выглядят более темными по сравнению с поверхностью кожи, что дает возможность установить их расположение.

В реальных условиях исходные снимки, получаемые с веноскопа, нередко обладают плохим отображением сосудистой системы. Главными проблемами являются низкая контрастность, которая определяет контуры сосудов, цифровой помехи сенсора камеры, неравномерное освещение исследуемой области и слабая выраженность сосудистого рисунка. Подобные факторы затрудняют визуальное обнаружение вен и снижает эффективность устройства.

С целью улучшения качества изображения была использована последовательная цифровая обработка. Первоначально выполнялось преобразование изображения в оттенки серого, что дало возможность игнорировать цветовые компоненты и сосредоточиться на анализе яркости. Далее применялась медианная фильтрация для удаления импульсных шумов не затрагивая при этом контуры кровеносных сосудов. После этого применялось адаптивное выравнивание гистограммы, которое усиливало локальную контрастность и делало различия между венами и окружающими тканями более заметными. Далее проводилась процедура сглаживания с помощью гауссового фильтра для подавления высокочастотных помех и повышения однородности изображения. Финальным шагом стала повторная медианная фильтрация для окончательной очистки изображения.

Обработка способствовала существенному росту качеству визуализации.

Видимость венозных структур улучшилась: они стали более очерченными, темными, с повышенной четкостью и контрастом на фоне кожного покрова. Это значительно упрощает локализацию сосудов, способствуя более точному выполнению венепункции у пациентов.

Так же заметим, что конечный итог обусловлен совокупностью условий: параметрами сенсора камеры, интенсивностью и равномерностью светового потока, падающего на кожу пациента, правильным расположением прибора, а также особенностями самого пациента, в частности, глубиной залегания вен и качеством кожных покровов.

Накопленные сведения свидетельствуют о том, что разработанная методика, сочетающая инфракрасное сканирование гемоглобина с методами цифровой обработки изображений, представляет собой многообещающее направление для создания современных веноскопов. В перспективе планируется доработать аппаратную часть, т.е. увеличить детализацию сенсоров камеры и интегрировать алгоритмы машинного обучения для автоматического определения сосудистой сети в режиме реального времени.

Библиографический список

1. Гаргат, Е. А. Опыт применения инфракрасного визуализатора вен в клинической практике / Е. А. Гаргат // Медицинский вестник. – 2019. – № 4. – С. 33 – 36

2. Коростылева, И. С. Биотехническая система для визуализации вен: разработка и испытания / И. С. Коростылева // Вестник биомедицинской техники. – 2022. – № 3. – С. 50 – 57.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ИЗ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

А. И. Моренец, А. А. Аристов

Томский политехнический университет, Томск, Россия
(e-mail: morenetz.artem@gmail.com; aristov@tpu.ru)

Болезнь Альцгеймера (БА) представляет собой нейродегенеративное заболевание, приводящее к появлению симптомов деменции, снижению когнитивных функций и поведенческим изменениям. Ухудшение состояния здоровья

человека в период между появлением первых признаков болезни до тяжелых клинических изменений может проходить постепенно и едва заметно.

Согласно исследованиям, сочетание методов машинного обучения и электроэнцефалографии (ЭЭГ) позволяет применить преимущества обоих методов в диагностике когнитивных нарушений с высокой эффективностью [1, 2]. В работе проведена реализация алгоритма формирования набора обучающих и тестовых данных из сигналов ЭЭГ, предназначенных для применения в методах машинного обучения в задачах диагностики болезни Альцгеймера.

Набор сигналов ЭЭГ, используемых в данной работе, содержит более 800 мин записей для субъектов с БА и контрольной группы, записанных с частотой дискретизации 500 Гц и разрешением 10 мкВ/мм [3]. При реализации алгоритма был использован пакет программ *MATLAB* и библиотека *EEGLAB*. На рисунке 1 представлены этапы обработки сигнала.

Вычисление значений классификационных признаков (предикторов) проводилось для каждого канала и для каждого ритма. Разбиение сигнала на эпохи обеспечивает квазистационарность исследуемых сигналов и увеличивает количество вектор-строк получаемых данных. В таблице 1 представлены примеры значений для полученных классификационных признаков с обозначением классов для здоровых (*CN*) и больных (*AD*) субъектов.

В результате преобразований было получено 304 признака временной области и 855 признаков частотной области. Общее количество признаков составило 1159 объемом в 13 282 вектор-строк. Предварительная оценка прогностической способности общего набора данных демонстрирует, что для модели линейного классификатора на базе машины опорных векторов, точность и сходимость составили 0,87 и 0,85 соответственно, *AUC* = 0,94.

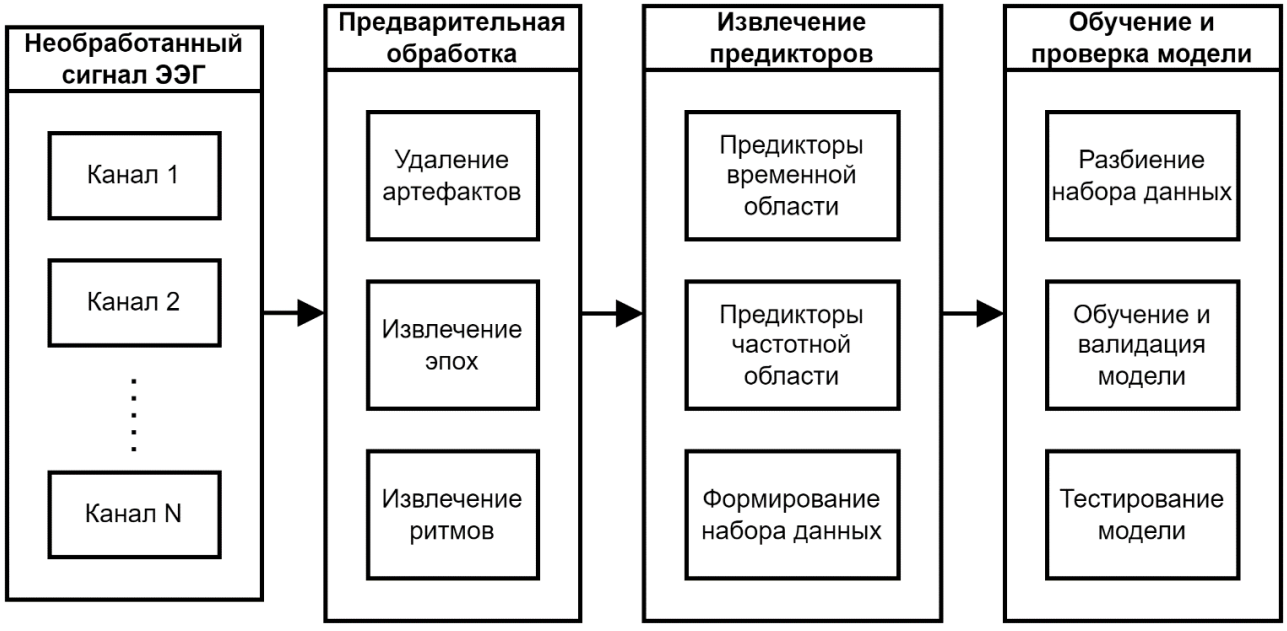


Рис. 1. Этапы обработки сигналов ЭЭГ при формировании набора классификационных признаков

1. Часть таблицы полученных данных

№	Частотные признаки				Временные признаки				Класс
	*DeltaFp*1*FMAX*, мкВ^2/Гц	…	*ThetaF*8*RBP*	…	*Fp*1*STD*, мкВ	…	*C*3*MOBIL*	…	
1	1794	…	0,0007	…	39,05	…	0,0378	…	*AD*
2	1013	…	0,003	…	31,93	…	0,0402	…	*CN*
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
N	922	…	0,0019	…	30,65	…	0,0491	…	*AD*

Библиографический список

1. Khatun, S. A single-channel EEG-based approach to detect mild cognitive impairment via speech-evoked brain responses / S. Khatun, B. I. Morshed, G. M. Bidelman // IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. – 2019. – Т. 27, No. 5. – P. 1063 – 1070.
2. Combining EEG signal processing with supervised methods for Alzheimer's patients classification / G. Fiscon, E. Weitschek, A. Cialini, et al. // BMC Med Inform Decis Mak. – 2018. – Т. 18, No. 1. – P. 1 – 10.
3. A Dataset of Scalp EEG Recordings of Alzheimer's Disease, Frontotemporal Dementia and Healthy Subjects from Routine EEG / A. Miltiadous, K. D. Tzimourta, T. Afrantou, et al. // Data. – 2023. – Т. 8, No. 6.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СТРЕССА

Д. К. Нгуен[1], Т. Л.Чан[1], Т. Ю. Дорохова[2]

[1]Военно-Промышленный Колледж, Вьетнам,
[2]Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Человек ежедневно подвергается различным стрессовым ситуациям, которые в свою очередь вызывают различные эмоции от радости до гнева. Эмоциональный стресс человека влияет на здоровье, так как эмоции имеют прямую и обратную связь со всеми системами и органами человека и зарождаются непосредственно в центральной нервной системе.

При оценке уровня стресса осуществляется анализ пространственно-временных параметров мимики, пантомимики, движений глаз, тембра голоса и интонаций. Недостатком такого рода исследований является необходимость

жесткой стандартизации условий исследования и их трудоемкость, что делает непригодным их проведение для обследования больших групп людей, подверженных риску эмоционального стресса.

Принципиально новый подход к распознаванию того, что человек испытывает стресс, включает регистрацию электрофизиологических параметров, служащих биологическими коррелятами психического стресса, таких как частота сердцебиений и дыхания, уровень кровяного давления, тремор и подвижность, электроокулография, электрокардиография, электроэнцефалография, электромиография, кожно-гальваническая реакция [1]. Структурная схема электроэнцефалографического канала показана на рис. 1.

На структурной схеме приведены основные блоки разрабатываемого прибора: ИУ – инструментальный усилитель, ОУ – операционный усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

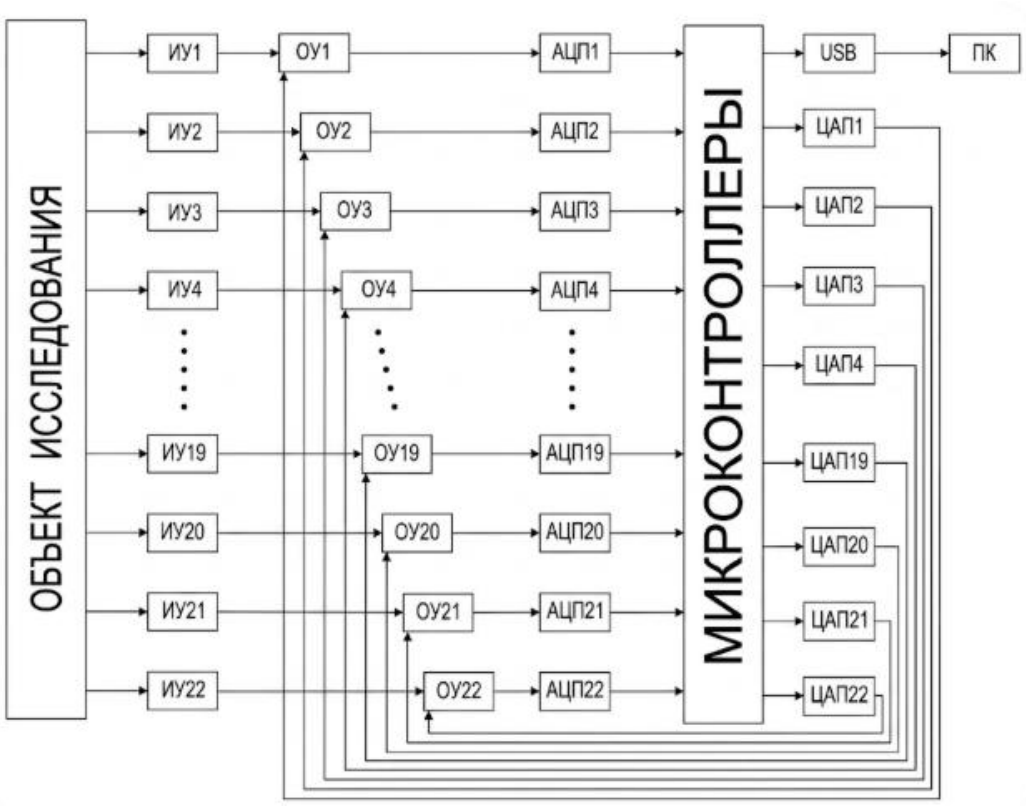


Рис. 1. Структурная схема электроэнцефалографического канала

Диагностика осуществляется в следующей последовательности: медицинские электроды устанавливают на голову человека согласно международной системе отведений 10…20%, затем сигналы с электродов поступают на инвертирующий и неинвертирующий входы инструментальных усилителей, которые обеспечивают согласование выходного сопротивления биообъекта и усилителя. Снимаемые сигналы с выхода инструментальных усилителей поступают на неинвертирующие входы операционных усилителей. Далее сигналы поступают на вход АЦП и после оцифровки поступают на вход микроконтроллера, который оценивает входной сигнал и при наличии постоянной составляющей

выдает сигнал на ЦАП для устранения постоянного сигнала на входе путем подачи компенсирующего напряжения на инвертирующий вход операционных усилителей. Сигнал через микропроцессор поступает на вход USB компьютера, на котором выполняются сбора и анализа полученной информации.

На рисунке 2 показана запись сигналов электроэнцефалограммы, которая показывает, что испытуемый испытывает стресс.

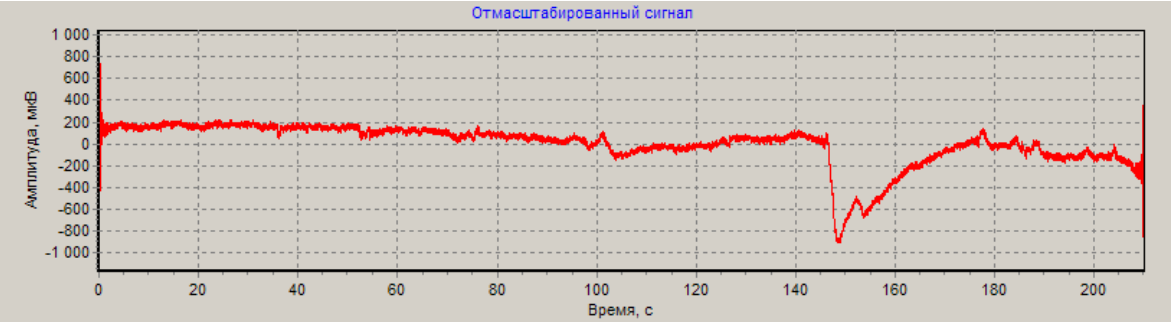


Рис. 2. Записи сигналов электроэнцефалографии

По уровню амплитуды колебаний можно оценить уровни эмоционального стресса человека. Нейтральные вопросы показывали незначительные искажения кривой электроэнцефалограммы или не показывали их вообще, в отличие от «тревожных вопросов», показывавших самые высокие колебания. Это говорит о том, что воздействие на психоэмоциональную сферу человека влечет за собой довольно значительные физиологические отклики в организме, в данном случае это изменение мозговой активности.

Библиографический список

1. Биопотенциалы мозга человека. Математический анализ / под ред. В. С. Русинова. – М. : Медицина, 1987. – 256 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Р. А. Нурдинова, С. Б. Абдуллаева

Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
(e-mail: nurdinovar2016@mail.ru, mardlik65@gmail.com)

Область систем измерения и контроля артериального давления является одной из важнейших и быстро развивающихся областей современной медицины и биомедицинской инженерии. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) на сердечно-сосудистые заболевания сегодня приходится примерно 31% всех смертей в мире, что является самым высоким показателем среди всех групп заболеваний [1, 2]. Гипертония, т.е. постоянно повышенное артериальное давление, признана одним из основных факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний. В Республике Узбекистан примерно 30…40% взрос-

лого населения страдают от артериальной гипертензии различной степени тяжести, но большинство этих пациентов не знают о своем заболевании или не контролируют его должным образом.

Современные интеллектуальные системы измерения и контроля артериального давления позволяют преодолеть вышеупомянутые ограничения и перейти на качественно новый уровень. Использование искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения значительно повышает уровень точности системы и позволяет ей адаптироваться к индивидуальным физиологическим особенностям [3, 4].

Безманжеточные технологии измерения артериального давления представляют собой одно из наиболее перспективных направлений современной биомедицинской инженерии. Эти технологии не требуют использования традиционной манжеты и позволяют проводить непрерывный мониторинг, не мешая повседневной деятельности пациента. Безманжеточные методы определяют артериальное давление косвенно через физиологические параметры, т.е. вместо прямого измерения давления они делают выводы об артериальном давлении, измеряя свойства кровеносных сосудов, динамику кровотока и другие параметры сердечно-сосудистой системы и они являются неотъемлемой частью системы Интернета вещей (IoT). Датчики и преобразователи передают полученные данные по беспроводным протоколам связи (Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, LTE, NB-IoT) на смартфоны, планшеты или специальные шлюзовые устройства. Там данные проходят предварительную обработку, а затем передаются на облачные серверы. Благодаря возможностям облачных вычислений становится возможным использование сложных алгоритмов искусственного интеллекта в режиме реального времени и анализ больших объемов данных.

Использование Интернета вещей (IoT) и облачных вычислений открывает ряд возможностей. Во-первых, данные пациента могут одновременно отслеживаться несколькими врачами и членами семьи. Во-вторых, данные сотен тысяч пациентов могут анализироваться на облачной платформе для выявления общих тенденций и закономерностей. В-третьих, с помощью телемедицинских услуг врач может удаленно наблюдать за пациентом и при необходимости изменить консультацию или схему лечения. В-четвертых, алгоритмы искусственного интеллекта могут постоянно обучаться и совершенствоваться на основе новых данных. Однако такой подход также поднимает вопросы безопасности данных и конфиденциальности пациентов.

В целом, системы измерения и контроля артериального давления являются одной из важнейших областей современной медицины. Поскольку артериальная гипертензия часто имеет латентное течение и приводит к серьезным осложнениям, ее ранняя диагностика и постоянный мониторинг имеют большое значение. Традиционные инвазивные методы, несмотря на высокую точность, используются в ограниченном количестве случаев из-за их практического риска. Неинвазивные методы с использованием манжет широко распространены, но имеют определенные ограничения с точки зрения непрерывного мониторинга и комфорта пациента. В последние годы интеллектуальные системы мониторинга артериального давления, основанные на цифровых технологи-

ях, методах измерения без манжеты, искусственном интеллекте и Интернете вещей, создали новые возможности для решения этих проблем. Эти системы обладают функциями сбора данных в реальном времени, анализа, прогнозирования и автоматического оповещения, обеспечивая персонализированный медицинский подход.

Разработка современных интеллектуальных систем измерения и контроля артериального давления играет важную роль в профилактике гипертонии и сердечно-сосудистых заболеваний, снижении осложнений и улучшении общественного здоровья. В будущем ожидается дальнейшее повышение точности и надежности этих систем и их широкое применение в клинической практике.

Библиографический список

1. Фролова, М. С. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / М. С. Фролова, С. В. Фролов, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Специальный выпуск 52. – С. 106 – 111.

2. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

3. Фролов, С. В. Объектно-ориентированная декомпозиция информационной модели изделий медицинской техники / С. В. Фролов, М. С. Фролова // Ползуновский альманах. – 2016. – № 2. – С. 112 – 117.

4. Фролова, М. С. Оптимальный выбор изделия медицинской техники с использованием информационных систем в здравоохранении / М. С. Фролова, С. В. Фролов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 553 – 561.

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Р. А. Нурдинова, М. В. Рустамов

Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
(e-mail: nurdinovar2016@gmail.ru; mardlik65@gmail.com)

Медицинское оборудование требует регулярного технического обслуживания. Это включает калибровку, промывку, фильтрацию и ремонт критически важных деталей. Разработка планов ежегодного обслуживания и ремонта оборудования в больницах обеспечивает его долгосрочную эксплуатацию [1].

К основным направлениям продления срока службы медицинского оборудования относятся [2]:

– **калибровка:** медицинское оборудование, особенно средства диагностики и мониторинга, должно проходить регулярную калибровку. Этот процесс обеспечивает точность приборов, а также предотвращает сбои в работе или выдачу ошибочных результатов;

– **правильная эксплуатация:** для обеспечения долговечности медицинского оборудования необходимо его правильное использование. Организация регулярных тренингов и курсов повышения квалификации для персонала и пользователей гарантирует эффективную работу приборов;

– **соблюдение инструкций производителя:** необходимо соблюдать правила эксплуатации, установленные производителем для каждого вида оборудования. Для продления срока службы устройства важно учитывать его технические характеристики, возможности и пределы эксплуатации;

Важную роль для технического обслуживания играют следующие мероприятия, обеспечивающие долгосрочную работу медицинских устройств:

1. Профилактическое обслуживание. Включает непрерывные проверки и ремонт до и во время эксплуатации оборудования. Это позволяет улучшить работу техники, продлить срок ее службы и предотвратить возникновение ошибок.

2. Запасные части и комплектующие. Для длительной эксплуатации необходимо постоянно обновлять запасные части. Изношенные детали должны своевременно заменяться, что продлевает жизнь всему устройству.

3. Бережная эксплуатация. Осторожное обращение с медицинским оборудованием обеспечивает его эффективную работу на долгие годы. Факторы риска, такие как механические повреждения или работа при экстремально высоких/низких температурах, могут привести к поломке техники.

В настоящее время инновационные подходы к продлению срока службы являются важным аспектом продления срока службы приборов.

Искусственный интеллект (AI) и аналитические инструменты: с помощью технологий ИИ можно отслеживать состояние оборудования в режиме реального времени и выявлять системные проблемы. Также ИИ помогает эффективно организовывать профилактическое обслуживание.

3D-печать: использование технологий 3D-печати позволяет быстро и точно изготовлять запасные части для медицинского оборудования. Это полезно для сокращения времени простоя, так как необходимые детали можно заменить в кратчайшие сроки.

Технологии IoT (Internet of Things): с помощью Интернета вещей можно осуществлять дистанционный мониторинг состояния приборов. Эта система упрощает отслеживание работы оборудования и заблаговременное выявление проблем.

Продление срока службы медицинского оборудования достигается путем его правильной эксплуатации, технического обслуживания и внедрения инновационных технологий. Эффективный сервис и регулярный ремонт имеют решающее значение для безопасной и долгой работы техники. Кроме того, новые технологии позволяют повысить производительность и долговечность приборов.

Медицинское оборудование является основополагающим элементом систем здравоохранения; его эффективная работа имеет огромное значение для диагностики и лечения. Для достижения этих целей необходимы качественный сервис, технический контроль и инновационные подходы.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.
2. Фролов, С. В. Объектно-ориентированная декомпозиция информационной модели изделий медицинской техники / С. В. Фролов, М. С. Фролова // Ползуновский альманах. – 2016. – № 2. – С. 112 – 117.

ОБЗОР ДАТЧИКА AD8232 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКГ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И СТУДЕНЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ

Д. В. Павлов, А. А. Коробов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: pavlodani117@gmail.com)

Измерение электрокардиограммы (ЭКГ) остается одним из ключевых методов диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, однако традиционное оборудование часто недоступно для учебных лабораторий из-за высокой стоимости и сложности.

AD8232 – это специализированная интегральная микросхема (аналоговый сигнальный процессорный фронтенд), выпускаемая компанией Analog Devices, которая представляет собой полностью интегрированный одноканальный (single-lead) аналоговый интерфейс для мониторинга сердечного ритма, предназначенный для обработки сигналов ЭКГ и других биопотенциалов. Этот датчик разработан для выделения, усиления и фильтрации чрезвычайно слабых биопотенциальных сигналов сердца на фоне сильных шумов и помех, неизбежно возникающих при движении пациента или использовании удаленных электродов. Микросхема выпускается в миниатюрном 20-контактном корпусе LFCSP размерами 4×4 мм. Ключевые технические характеристики включают: однополярное напряжение питания от 2,0 до 3,5 В, чрезвычайно низкий ток потребления – всего 170 мкА в типовом режиме, высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала 80 дБ (в диапазоне от постоянного тока до 60 Гц), что критически важно для подавления сетевых помех, а также высокий коэффициент усиления сигнала (G = 100) с возможностью подавления постоянной составляющей. Чип поддерживает конфигурации с двумя или тремя электродами и имеет встроенные регулируемые фильтры: 2-полюсный фильтр высоких частот для устранения артефактов движения и потенциала полуэлемента электродов, а также

3-полюсный фильтр низких частот для удаления дополнительных шумов. Дополнительные функции включают усилитель формирования опорного сигнала правой ноги (Right Leg Drive) для улучшения качества сигнала детектор отрыва электрода от тела (Leads Off Detection) с возможностью выбора режима AC или DC, встроенный RFI-фильтр для подавления радиопомех, рейтинг электростатической защиты 8 кВ (HBM), а также режим быстрого восстановления (Fast Restore), который автоматически ускоряет настройку фильтров после резких изменений сигнала, например, при подключении электродов. Это делает его идеальным для использования в портативных, носимых и удаленных мониторах здоровья, а также в фитнес-устройствах, игровой периферии и системах сбора биопотенциальных сигналов.

Датчик AD8232 удобен для студенческих проектов, основанных на анализе сигнала ЭКГ, например, вычисления биологического возраста на основе анализа скорости распространения пульсовой волны [1]. Тем не менее, стоит отметить, что полученный сигнал требует обязательной цифровой обработки (фильтрации, детекции QRS) – именно это дает студентам ценный практический опыт в области обработки биомедицинских сигналов.

В последние годы наблюдается тенденция к использованию датчиков, совместимых с программно-аппаратными платформами Raspberry Pi и Arduino, что существенно повышает доступность лабораторных исследований и ускоряет разработку прототипов медицинских устройств [2, 3].

Библиографический список

1. Моргунов, Н. Р. Факторы биологического возраста / Н. Р. Моргунов, Е. В. Сеченева // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апреля 2024 года. – Гомель : Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2024. – С. 16 – 18.

2. Экспериментальная установка для исследования особенностей управления микроклиматом в неонатальных инкубаторах с использованием гидродинамического фантома новорожденного / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 52 – 59.

3. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ОБЗОР ДАТЧИКА MAX30100 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСА И САТУРАЦИИ КРОВИ В ПОРТАТИВНЫХ МЕДИЦИНСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Д. В. Павлов, К. С. Савинова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: pavlodani117@gmail.com)

Современная медицинская электроника активно развивается в сторону портативных и носимых устройств для непрерывного мониторинга состояния пациента. Особую актуальность представляет неинвазивный контроль насыщения крови кислородом, что стало особенно критично при заболеваниях, связанных с COVID-19. Высокую значимость приобретает неинвазивный контроль насыщения крови кислородом (SpO_2) и частоты сердечных сокращений. Таким образом, появляется все больше исследований в области анализа дыхания, его частоты и глубины, а также комплексной оценки респираторной функции – это востребовано как в клинической практике, так и в домашнем мониторинге. Для удешевления подобных исследований активно применяются датчики, совместимые с Raspberry и Arduino. Это делает возможным применение исследований даже для небольших лабораторий и студенческих проектов [1, 2].

Одним из таких решений является интегральная микросхема MAX30100 компании Maxim Integrated (ныне Analog Devices). Датчик MAX30100 представляет собой интегральную микросхему, объединяющую функции пульсоксиметра для измерения уровня кислорода в крови и монитора сердечного ритма, разработанную специально для портативных и носимых медицинских устройств. Этот датчик включает в себя на одном кристалле два светодиода – красный с длиной волны около 660 нм и инфракрасный с длиной волны 880…940 нм, а также фотодетектор для улавливания отраженного или прошедшего через палец света и малошумящий аналоговый интерфейс обработки сигнала.

Принцип работы основан на фотоплетизмографии: светодиоды излучают свет на палец, кровь в сосудах пульсирует в такт с сердечными сокращениями, меняя поглощение света, а фотодетектор фиксирует эти изменения, после чего встроенная электроника вычисляет пульс и уровень насыщения крови кислородом. Основные технические характеристики: напряжение питания 1,8…3,3 В (готовые модули часто питаются от 3,3 или 5 В), ток потребления в активном режиме программируется до 50 мА на светодиоды, в режиме ожидания – 0,7 мкА, интерфейс связи I2C. Схема пульсоксиметра на модуле ESP32 и датчике MAX30100 представлена на рис. 1.

Для подключения к ESP32 используются линии I2C: VCC подключается к 3,3 В на ESP32, GND к GND, SCL к GPIO 22, SDA к GPIO 21, при этом рекомендуется подтянуть линии SDA и SCL к 3,3 В через резисторы 4,7 кОм для стабильной работы.

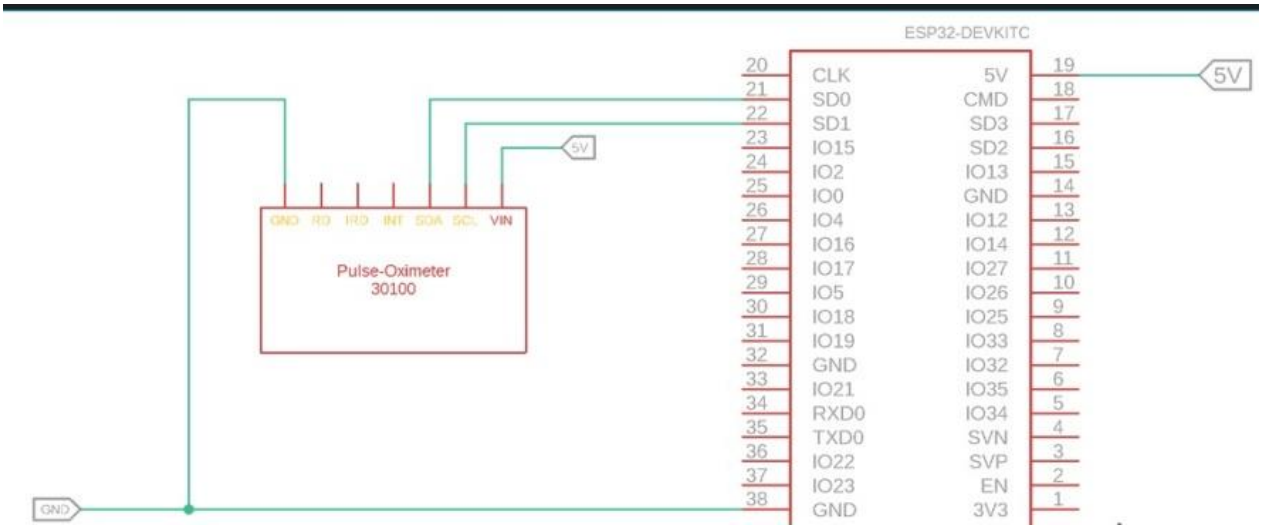


Рис. 1. Схема пульсоксиметра на модуле ESP32 и датчике MAX30100

Датчик MAX30100 может быть эффективно использован в образовательном процессе для понимания принципов работы пульсоксиметрии, а также исследовательской работы: от анализа влияния помех до создания прототипов медицинских устройств. Низкая стоимость и простота интеграции делают его ценным инструментом для учебных лабораторий и научных групп [1, 2].

Библиографический список

1. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

2. Использование нейроконтроллера и электрохромного остекления в инкубаторах для новорожденных для адаптивной имитации смены дня и ночи / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова // Медицинская техника. – 2024. – № 4(346). – С. 14 – 16.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭКГ

Д. В. Панькин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: panakunin@gmail.com)

Сердечно-сосудистые заболевания остаются ведущей причиной смертности населения, что определяет высокую актуальность разработки точных и доступных методов ранней диагностики. Электрокардиография является основным инструментом первичного обследования пациентов с подозрением на кардиальную патологию, однако качественная интерпретация ЭКГ требует высокой квалификации врача, тогда как встроенные автоматические алгоритмы нередко демонстрируют недостаточную диагностическую точность. Под системой поддержки принятия врачебных решений (СППВР) в данном контексте понимается программно-алгоритмический комплекс, предназначенный для аналитической помощи при диагностике, прогнозировании и мониторинге состояния пациента на основе обработки медицинских данных. В англоязычной литературе закреплен термин Clinical Decision Support System (CDSS). Далее в тексте будет использоваться сокращение СППВР.

К числу основных направлений применения СППВР на основе искусственного интеллекта в медицине относятся: автоматизированная диагностика заболеваний, анализ биомедицинских сигналов и медицинских изображений, а также интеграция в цифровые медицинские платформы. Одним из наиболее перспективных направлений является использование таких систем в электрокардиографии, где методы глубокого обучения позволяют анализировать ЭКГ как сложный временной сигнал и выявлять признаки сердечно-сосудистой патологии.

В современных СППВР электрокардиограмма рассматривается как многоканальный временной ряд. Такой подход дает возможность анализировать не только отдельные параметры сигнала, но и его полную временную структуру: морфологию волн, ритмическую динамику и пространственно-временные взаимосвязи между отведениями.

Разработка СППВР включает несколько последовательных технических этапов. В первую очередь осуществляется сбор и стандартизация цифровых ЭКГ-данных с последующей предобработкой сигнала, обучение модели на размеченных выборках, тестирование на независимой выборке. Существенное значение имеет не только архитектура нейронной сети, но и качество обучающего набора, его репрезентативность, полнота клинической разметки и соответствие реальным условиям работы медицинского учреждения.

Внедрение СППВР в практическое здравоохранение требует интеграции в существующую медицинскую информационную систему и адаптации к рабочему процессу врача. В штатном режиме система должна автоматически при-

нимать поступающую ЭКГ-запись, выполнять ее анализ, формировать интерпретируемый результат и передавать его врачу. При этом СППВР может использоваться в трех основных режимах: как инструмент скрининга (автоматическая фильтрация нормальных записей), как средство приоритизации случаев (выделение записей с высоким риском) или как источник второго независимого мнения.

После начала эксплуатации необходим постоянный мониторинг качества работы системы, учет изменений входных данных (дрейф распределения), сбор врачебной обратной связи и периодическое обновление модели.

Таким образом, СППВР для анализа ЭКГ представляет собой не отдельный алгоритм, а комплексную интеллектуальную систему анализа временных биомедицинских сигналов, ориентированную на клинически безопасное, устойчивое и эргономичное применение в реальных условиях лечебно-диагностического процесса.

Библиографический список

1. Мосин, С. Г. Нейросетевая диагностика заболеваний сердечно-сосудистой системы на основе data-driven-метода / С. Г. Мосин // Программные продукты и системы. – 2024. – № 1. – С. 122 – 130.

2. Cavus, N. A systematic review on the impact of artificial intelligence on electrocardiograms in cardiology / N. Cavus // International Journal of Medical Informatics. – 2025. – V. 195. – P. 105789.

3. Soloviev, I. A. Artificial intelligence applications in cardiology : a review / I. A. Soloviev, O. N. Kurochkina // Russian Journal of Cardiology. – 2024. – V. 29, No. 11S. – P. 5673.

АППАРАТЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Д. Г. Пелецкая

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: peletskayadasha@gmail.com)

Сердечно-сосудистые заболевания – ведущая причина смертности в мире. Ежегодно миллионы пациентов нуждаются в операциях на открытом сердце, которые невозможны без аппарата искусственного кровообращения (АИК). По данным ВОЗ, ишемическая болезнь сердца уносит около 9 млн жизней ежегодно. АИК является критически важным оборудованием, обеспечивающим сложнейшие кардиохирургические вмешательства и временную поддержку жизнедеятельности.

Чтобы понять возможности этого аппарата, следует рассмотреть его принцип действия. АИК («сердце-легкие») временно замещает функции сердца и легких. Венозная кровь поступает в оксигенатор, где насыщается кислородом и освобождается от CO_2. Артериальный насос (роликовый или центробежный) нагнетает кровь обратно в аорту. Блок управления контролирует температуру, давление и газовый состав крови.

Важно знать, какие компании производят данное оборудование. Мировой рынок представлен фирмами LivaNova (система S5), Getinge (Maquet), Terumo. Их продукция отличается высокой автоматизацией. Российские разработки – предприятие «Планета Инфо». Роль отечественных производителей – создание доступного оборудования и обеспечение технологической независимости.

Существует несколько подходов к разделению этих устройств на виды. По типу насоса выделяют роликовые (просты в управлении, но травмируют кровь) и центробежные (современный стандарт, менее травматичны). По типу оксигенатора мембранные стали «золотым стандартом». По назначению различают стационарные аппараты для плановых операций и портативные ЭКМО-системы для экстренной поддержки.

Современные технологии не стоят на месте, и АИК постоянно совершенствуются [1 – 3]. Мембранная оксигенация с гепариновым покрытием снижает риск тромбозов. Автоматизация включает сенсорные панели, контроль уровня крови и газоанализаторы. Интеграция систем кардиоплегии обеспечивает защиту миокарда при остановке сердца.

Как и любая сложная медицинская техника, АИК имеет свои сильные и слабые стороны. Преимущества: незаменимость в кардиохирургии, временное замещение функций, рост безопасности. Недостатки: инвазивность, риски кровотечений и тромбозов, высокая стоимость, травма крови (гемолиз).

Реальное применение этих аппаратов подтверждает их критическую важность. АИК обязателен для любой кардиохирургической клиники. Отечественный опыт: ведущие центры (им. Бакулева, им. Алмазова) выполняют все виды операций на открытом сердце. Зарубежный опыт: в США и Европе развиваются минимально инвазивная хирургия и ЭКМО.

Если говорить о будущем, то перспективы развития данного направления весьма многообещающи. Это миниатюризация компактных систем для транспортировки, интеллектуальное управление с использованием нейросетей для прогнозирования осложнений, новые материалы, имитирующие эндотелий, а также гибридные системы, интегрирующие функции АИК и имплантируемых насосов.

Подводя итог, можно сказать следующее. АИК – фундаментальный инструмент кардиохирургии и реаниматологии. Развитие технологии идет по пути миниатюризации, повышения биосовместимости и внедрения интеллектуальных систем. Дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение травмы крови и создание автономных портативных систем для расширения доступности высокотехнологичной помощи.

Библиографический список

1. Фролова, М. С. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / М. С. Фролова, С. В. Фролов, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Специальный выпуск 52. – С. 106 – 111.

2. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

3. Фролова, М. С. Оптимальный выбор изделия медицинской техники с использованием информационных систем в здравоохранении / М. С. Фролова, С. В. Фролов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 553 – 561.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА В СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО МОНИТОРИНГА

И. А. Попов, А. А. Подать, П. П. Фролов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tstu@tstu.ru)

В работе предложен и реализован нейросетевой классификатор технического состояния центробежного насоса, являющийся ключевым элементом разработанной системы мониторинга. В отличие от традиционных пороговых методов, классификатор на основе многослойного перцептрона выполняет одновременный анализ шести диагностических параметров: давление на входе и выходе, расход жидкости, температура подшипников, вибрация корпуса и ток электродвигателя. Архитектура сети: входной слой – 6 нейронов (по числу параметров), один скрытый слой из 12 нейронов с функцией активации, выходной слой – 6 нейронов, соответствующих шести диагностируемым состояниям (норма, кавитация, дисбаланс ротора, дефект подшипников, износ рабочего колеса, засорение проточной части). Обучение проведено на синтетической выборке объемом 3000 примеров, сгенерированной на основе типовых диапазонов параметров для каждого состояния с добавлением гауссова шума. Данные нормализованы методом стандартизации; выборка разделена на обучающую (80%) и тестовую (20%).

1. Результаты моделирования

Состояние	Точность	Полнота	F1-мера	Поддержка
Норма	1.00	1.00	1.00	421
Кавитация	1.00	1.00	1.00	59
Дисбаланс	1.00	1.00	1.00	35
Дефект подшипников	1.00	1.00	1.00	34
Износ колеса	1.00	1.00	1.00	25
Засорение	1.00	1.00	1.00	26

Матрица ошибок (строки – истинное состояние, столбцы – предсказанное):

```
[[421   0   0   0   0   0]
 [0   59   0   0   0   0]
 [0   0   35   0   0   0]
 [0   0   0   34   0   0]
 [0   0   0   0   25   0]
 [0   0   0   0   0   26]]
```

Результаты тестирования показали общую точность классификации 98%, при этом матрица ошибок является диагональной – ни один из классов не был спутан с другим. Такая эффективность объясняется тем, что выбранные диагностические параметры обладают высокой взаимной информативностью, а скрытого слоя из 12 нейронов достаточно для разделения шести классов в шестимерном пространстве признаков. Для демонстрации работоспособности выполнен пример: вектор признаков [1,2 МПа; 4,0 МПа; 75 м³/ч; 72 °С; 4,2 мм/с; 95 А] классифицирован как «Кавитация» с высокой вероятностью. Преимуществами разработанного классификатора являются: отсутствие необходимости задания жестких порогов, устойчивость к зашумленным данным, возможность дообучения при накоплении реальных эксплуатационных записей, а также высокая скорость работы, позволяющая интегрировать его в программируемый логический контроллер без задержек реального времени. Нейросетевой классификатор обеспечивает достоверное раннее выявление дефектов центробежного насоса, что является основой для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию и снижения эксплуатационных рисков.

Библиографический список

1. Контроль состояния энергоемких объектов по данным телеметрической информации / Н. Г. Чернышов, Р. В. Цыганков, К. В. Чикаев, А. А. Миленин // Современные информационные технологии : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – 2013. – Вып. 18. – С. 114 – 116.

2. Валуев, И. К. Повышение эффективности процессов технического обслуживания и ремонта насосного оборудования с помощью методов машинного обучения / И. К. Валуев // Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М) – 2024) : материалы 2-й молодежной конф. с междунар. участием. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. – С. 171 – 173.

3. Классификация технического состояния насосного агрегата с использованием интеллектуальной идентификации неисправностей / А. В. Герасимов, Д. Ю. Муромцев, И. В. Огнев и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 3. – С. 71 – 85.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕДИЦИНСКОГО ИЗДЕЛИЯ

И. А. Попов, С. В. Фролов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: popovigor99@gmail.com)

Медицинская техника играет ключевую роль в оказании качественной и эффективной медицинской помощи. Оснащение медицинских центров современной медицинской техникой является ключевым аспектом обеспечения качественной и эффективной медицинской помощи. Однако оптимальный выбор медицинского изделия представляет собой сложную задачу, для решения которой для начала необходимо разработать информационную модель медицинского изделия (МИ), которая впоследствии будет использована в разработке СППР.

Информационная модель МИ на основе теоретико-множественного представления представляет собой множество

$$MD_k(t) = \{s_k, L_k, N_k, A_k, B_k, Clife_k(t)\},\ \ k = \overline{1,K},$$

где s_k – параметр, определяющий название k-й модели вида МИ; L_k – множество параметров k-й модели вида МИ, принимающих логические значения; N_k – множество параметров k-й модели вида МИ, принимающих целочисленные значения; A_k – множество параметров k-й модели вида МИ, принимающих вещественные значения; B_k – множество параметров k-й модели вида МИ, принимающих интервальные значения; $Clife_k(t)$ – вещественный параметр, определяющий стоимость владения k-й модели вида МИ.

$Clife_k(t)$ – это стоимость владения МИ от покупки до момента утилизации. Средний срок владения МИ составляет 5 лет. Данный срок закладывается заводом-производителем и учитывает необходимые регламентные работы, количество расходных материалов и не запланированные траты на ремонт

$$Clife(t) = C + C_s(t) + C_r(t) + C_u(t) - C_d(t),$$

где C – стоимость МИ; $C_s(t)$ – стоимость технического обслуживания за определенный промежуток времени владения МИ; $C_r(t)$ – стоимость расходных материалов за время владения МИ; $C_u(t)$ – стоимость коммунальных расходов; $C_d(t)$ – остаточная стоимость МИ после эксплуатации.

При выборе медицинского изделия необходимо учитывать также и эксплуатационную пригодность данного изделия.

Комплексная формула эксплуатационной пригодности выглядит следующим образом:

$$S_k = \alpha_1 R_k + \alpha_2 M_k + \alpha_3 E_k + \alpha_4 A_k,\ \ k = \overline{1,K},$$

где S_k – интегральный показатель эксплуатационной пригодности ($0 \le S \le 1$); R_k – компонент ремонтопригодности (бывшая надежность); M_k – компонент

метрологической пригодности; E_k – компонент эргономичности; A_k – компонент адаптивности к инфраструктуре; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – весовые коэффициенты значимости ($\sum \alpha_i = 1$).

Библиографический список

1. Фролова, М. С. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / М. С. Фролова, С. В. Фролов, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Специальный выпуск 52. – С. 106 – 111.

2. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

3. Фролов, С. В. Объектно-ориентированная декомпозиция информационной модели изделий медицинской техники / С. В. Фролов, М. С. Фролова // Ползуновский альманах. – 2016. – № 2. – С. 112 – 117.

4. Фролова, М. С. Оптимальный выбор изделия медицинской техники с использованием информационных систем в здравоохранении / М. С. Фролова, С. В. Фролов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 553 – 561.

МОДЕЛЬ ПЛАЦЕНТАРНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ ЖЕНЩИНЫ ВО ВРЕМЯ БЕРЕМЕННОСТИ

Е. В. Сеченева, Н. Р. Моргунов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: ekaterina48_48_secheneva@mail.ru, morgunov68ru@gmail.com)

Беременность женщины сопровождается выраженной перестройкой сердечно-сосудистой системы, которая направлена на обеспечение адекватного кровоснабжения развивающегося плода. В этот период формируется дополнительный функциональный контур – маточно-плацентарное кровообращение, приводящее к изменению параметров гемодинамики и требующее учета при построении инженерных моделей. Объем циркулирующей крови способен увеличиваться на 30…50%, что приводит к росту венозного возврата к сердцу и увеличению преднагрузки на него. Одновременно снижается общее периферическое сосудистое сопротивление, оказавшееся под влиянием гормональных факторов – это уменьшает постнагрузку. В конечном результате сердечный выброс возрастает на 40…50%, достигая при этом максимума во втором триместре беременности женщины.

Работа сердца в данных условиях определяется согласованной деятельностью правого и левого желудочков, функционирующих как единая гидродинамическая система. Основным принципом является равенство минутных объемов крови, перекачиваемых правым и левым желудочками:

$$Q_{\text{прав}} = Q_{\text{лев}}. \quad (1)$$

Это условие обеспечивает замкнутость системы кровообращения и предотвращает накопление крови в малом или большом круге. При беременности увеличение объема циркулирующей крови приводит к росту нагрузки на оба желудочка, однако левый желудочек испытывает более значительное воздействие, так как он обеспечивает системный и маточно-плацентарный кровоток. Правый желудочек, в свою очередь, адаптируется к увеличенному венозному возврату и поддерживает адекватный кровоток через легкие.

С точки зрения моделирования кровообращение может быть описано с использованием гидродинамической аналогии, где поток крови определяется градиентом давления и сопротивлением сосудистого русла:

$$Q = \frac{P_{\text{арт}} - P_{\text{вен}}}{R}. \quad (2)$$

Во время беременности сопротивление сосудов матки и плаценты существенно снижается, что приводит к перераспределению кровотока и увеличению доли сердечного выброса, направляемого в матку (до 20…30%). Плацента в данной модели рассматривается как дополнительная параллельная ветвь с низким гидравлическим сопротивлением, подключенная к системному кругу кровообращения.

Кровообращение в плаценте представлено в виде уникальной системы, включающей в себя два независимых, но функционально связанных контура – материнский и плодовый. Материнская кровь поступает в межворсинчатое пространство через спиральные артерии, где она омывает ворсины хориона. Затем кровь оттекает через венозные сосуды матки. Кровь плода циркулирует по системе капилляров, расположенных внутри ворсин, и доставляется через пупочные артерии, после чего возвращается к плоду уже по пупочной вене. При этом кровь матери и плода не смешивается.

В интегрированной модели кровообращения беременной женщины плацентарный контур включается в системный круг как низкорезистивный элемент, влияющий на общее распределение потоков. Поток крови от левого желудочка направляется в аорту, затем частично в маточные артерии и далее в плаценту, после чего возвращается по венозной системе к правой половине сердца. Таким образом плацента снижает общее периферическое сопротивление и увеличивает нагрузку на сердечный выброс.

Таким образом кровообращение во время беременности представляет собой сложную адаптивную систему, в которой взаимосвязь работы правого и левого желудочков, изменение сосудистого сопротивления и формирование плацентарного контура определяют общую гемодинамику. Учет этих факторов является необходимым условием для разработки адекватных моделей в медицинском приборостроении.

Библиографический список

1. Материнская гемодинамика и преэклампсия / Т. М. Нагоев, К. Т. Муминова, З. С. Ходжаева и др. // Акушерство и гинекология. – 2020. – № 1. – С. 5 – 12.
2. Мудров, В. А. Преэклампсия: современные представления о сердечно-сосудистых нарушениях и прогнозировании осложнений беременности / В. А. Мудров, Е. В. Юрасова, А. М. Зиганшин // Журнал акушерства и женских болезней. – 2022. – Т. 71, № 3. – С. 53 – 64.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

СОВРЕМЕННЫЙ ХИРУРГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ: КЛАССИФИКАЦИЯ, ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Д. А. Скачкова, Р. Н. Гасанов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: dianaskackova5@gmail.com)

Хирургия является одной из ключевых областей медицины, эффективность которой напрямую зависит от качества и функциональности используемого инструментария. Ежегодно в мире выполняется более 300 миллионов хирургических операций, и потребность в них неуклонно растет. Эволюция инструментов всегда была движущей силой прогресса в оперативном лечении. В связи с этим анализ современного состояния и тенденций развития хирургического оборудования является актуальной задачей [1].

Основным принципом классификации хирургических инструментов является функциональный подход. В соответствии с ним все многообразие инструментов можно разделить на четыре основные группы:

– режущие: предназначены для рассечения тканей (скальпели со сменными лезвиями, ножницы Mayo и Metzenbaum);

– зажимные и захватывающие: служат для фиксации тканей, пережатия сосудов и удержания игл (кровоостанавливающие зажимы типа Mosquito и Kocher, пинцеты анатомические и хирургические, в том числе атравматичные пинцеты Debakey);

– расширяющие и отводящие: обеспечивают доступ к операционному полю (крючки Farabeuf, ранорасширители Gelpi и Weitlaner);

– специализированные: объединяют инструменты для узких областей, таких как нейрохирургия (краниотомы, микроинструменты), эндоскопия (троакары, степлеры) и др.

Современные операционные все чаще оснащаются оборудованием, работа которого основана на сложных физических принципах [1]. Ключевым

примером являются электрохирургические аппараты, использующие токи высокой частоты для коагуляции и рассечения тканей. В монополярном режиме ток проходит через тело пациента к нейтральной пластине, а в биполярном – замыкается между браншами инструмента, что безопаснее для тонких структур. Еще одна передовая технология – ультразвуковая диссекция, позволяющая селективно разрушать и удалять паренхиматозные ткани, сохраняя при этом крупные сосуды и протоки.

На мировом рынке хирургического оборудования доминируют такие компании, как Johnson & Johnson, Medtronic, Stryker, Karl Storz и Olympus. Их продукция задает стандарты качества и инноваций. В России активно развивается собственное производство.

Дальнейшее развитие хирургического инструментария связано с переходом к «интеллектуальной операционной». Основные направления включают в себя интеграцию с роботизированными системами, внедрение алгоритмов искусственного интеллекта для анализа операционного поля в реальном времени и предупреждения хирурга о потенциально опасных зонах, применение аддитивных технологий для создания персонализированных имплантатов [2, 3].

Проведенный анализ показывает, что современный хирургический инструментарий представляет собой сложную наукоемкую область медицинской техники. Переход от пассивных инструментов к активным интеллектуальным системам открывает новые горизонты для повышения безопасности и эффективности оперативных вмешательств. Дальнейшие исследования и разработки должны быть направлены на интеграцию новейших цифровых технологий и материалов, что позволит минимизировать влияние человеческого фактора и превратить операционную в высокоточную среду.

Библиографический список

1. Хирургические инструменты и аппараты: предназначение и использование : учебное пособие / под ред. Е. Е. Ачкасова, В. А. Мусаилова, В. Н. Николенко, А. В. Есипова. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2025. – 216 с.

2. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

3. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

ИСКУССТВЕННЫЕ КЛАПАНЫ СЕРДЦА

А. С. Соломатина

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: anniesolomatina@yandex.ru)

В настоящее время сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ), по данным Всемирной организации здравоохранения, занимают главную роль среди причин смертности во всем мире. Пороки клапанов сердца среди ССЗ занимают третье место после артериальной гипертензии и ишемической болезни сердца (ИБС). Поэтому единственным эффективным методом лечения является установка искусственного клапана сердца [1, 2].

Принцип работы зависит от типа протеза. Механические клапаны открываются и закрываются под действием перепада давления. Биологические создаются из обработанных тканей животного или человека для имитации естественного клапана.

Механические клапаны служат 20 – 30 + лет, не требуют замены, но требуют пожизненного приема антикоагулянтов (риск инсульта или кровотечений) и слышны щелчками.

Биологические клапаны не требуют постоянного приема антикоагулянтов, бесшумны, но быстрее изнашиваются (особенно у молодых) и требуют повторной операции.

Основными производителями являются: на рынке доминируют западные игроки (Edwards Lifesciences, Medtronic, Abbott, LivaNova). В России монополистом является НПП «МедИнж» (Пенза), выпускающее 70…80% имплантов. Уникальные разработки «МедИнж» включают механический клапан из монолитного пироуглерода (срок службы более 100 лет) и модель «МедИнж-СТ», снижающую риск тромбов [3].

Современные тренды включают: малоинвазивность (TAVI через прокол в ноге), биосовместимость (создание клапана из тканей пациента, 3D-печать) и разработка саморассасывающихся каркасов.

Современная эволюция искусственных клапанов сердца базируется на трех столпах: малоинвазивности, биосовместимости и персонализации. Хирургия все чаще отказывается от открытых операций. Искусственные клапаны сердца стали одним из важнейших достижений кардиохирургии, подарившим жизнь миллионам пациентов с пороками сердца. Их использование позволяет восстановить нарушенную гемодинамику и вернуть человека к полноценной активности, когда собственная ткань клапана уже не подлежит восстановлению. Развитие малоинвазивных технологий, таких как транскатетерная имплантация (TAVI), позволило проводить замену клапана даже ослабленным и пожилым пациентам без полостной операции и искусственного кровообращения. Намечаются направления, связанные с применением искусственного интеллекта и методов нейронных сетей для разработки новых моделей клапанов сердца [4, 5].

Библиографический список

1. Малиновский, Н. Н. Биологические протезы клапанов сердца / Н. Н. Малиновский, Б. А. Константинов, С. Л. Дземешкевич. – М. : Медицина, 1988. – 255 с.
2. Болезни биопротезов клапанов сердца: классификация, механизмы, диагностика, профилактика, лечение / под ред. Л. С. Барбараша, А. В. Евтушенко. – Кемерово : Примула, 2024. – 168 с.
3. Концепция автоматической разработки полимерного протеза клапана сердца / К. Ю. Клышников, П. С. Онищенко, Т. В. Глушкова и др. // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. – 2025. – Т. 40, Вып. 3. – С. 225 – 234.
4. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.
5. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННОГО ОБУЧЕНИЯ В БИОНИЧЕСКИХ ПРОТЕЗАХ

Н. О. Тадевосян

Тамбовский государственный технически университет Тамбов, Россия
(e-mail: noriktadevosan1@gmail.com)

Современные активные протезы с миоэлектрическим управлением используют пороговую обработку выпрямленного сигнала электромиограммы (ЭМГ), имеющие от 2 до 4 электродов. Несмотря на простоту и коммерческий успех, такие решения сталкиваются с фундаментальным ограничением: детерминированное отображение «амплитуда ЭМГ – тип движения» не учитывает вариабельность мышечной активности из-за утомления, потоотделения, смещения электродов или пластичности мышечных групп после ампутации. Как следствие, около 30…40% пользователей отказываются от многофункциональных протезов, ссылаясь на топорность управления, не позволяющего делать большинство бытовых дел и высокую когнитивную нагрузку из-за неестественности движений протеза.

В отличие от этого системы с нейронным обучением (например, экспериментальная платформа Coapt GEN2 или проекты DARPA HAPTIX для военных, получивших увечья) переходят от жесткого программирования к адаптации. Здесь протез не выполняет заранее заданные команды, а непрерывно обучается декодировать паттерны двигательных намерений человека, используя данные с матриц высокоплотностной ЭМГ (64 – 256 каналов).

Ключевая инновация – применение рекуррентных нейронных сетей (LSTM) и сверточных архитектур (CNN) к многоканальной ЭМГ. В отличие от линейных дискриминантных моделей, многослойные сети способны выявлять временные зависимости (например, когерентность активации агонистов и антагонистов) и пространственные паттерны, скрытые от пороговых методов.

На практике это реализуется следующим образом:

1. Сбор обучающей выборки: пользователь совершает шесть-восемь естественных движений (схватывание, поворот кисти, подъем пальца) в течение 5…10 мин, система запоминает многоканальную ЭМГ-карту.

2. Обучение происходит на устройстве: встраиваемый процессор или аналоги выполняют стохастический градиентный спуск, оптимизируя веса сети для минимизации ошибок между предсказанным и реальным движением.

3. Адаптация в реальном времени: при обнаружении нестабильности (например, снижение точности классификации с 95 до 75%) протез инициирует короткий цикл до обучения на последних 200 выборках, не прерывая работу пользователя.

Исследования показывают, что такая схема увеличивает число распознаваемых движений при той же плотности электродов. Причем ключевое преимущество не в количестве, а в естественности: нейросеть моделирует не дискретные команды, а непрерывное векторное поле мышечно-суставных координат, что позволяет протезу автоматически сглаживать траекторию захвата, тем самым делая его движения более живыми и естественными.

Нейронное обучение уже доказало клиническую состоятельность в будущих бионических протезах. Ожидается, что к 2030 году не менее 60% бионических протезов верхних конечностей будут содержать встроенные нейросетевые контроллеры с непрерывной адаптацией. Однако основная сложность лежит не в увеличении глубины сетей, а в решении задач предсказуемости, энергоэффективности и разработке имплантируемых ЭМГ-электродных матриц, позволяющих снимать сигнал без артефактов движения.

Библиографический список

1. Шустова, В. А. Применение 3D-технологий в ортопедической стоматологии : учебное пособие / В. А. Шустова, М. А. Шустов. – Изд-во СпецЛит, 2016. – 159 с.

2. Выявление локальных особенностей сигнала электроэнцефалографа с использованием искусственной нейронной сети / Д. Е. Судаков, П. С. Ш. Матея, В. М. Д. К. Фуши, С. В. Фролов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 7(79). – С. 230 – 237.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ ОСНАЩЕНИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО КАБИНЕТА

Н. О. Тадевосян

Тамбовский государственный технически университет Тамбов, Россия
(e-mail: noriktadevosan1@gmail.com)

Оснащение стоматологического кабинета напрямую влияет на качество лечения, безопасность пациента и эффективность работы врача, а также на экономическую эффективность расходов стоматологической организации [1]. Согласно приказам Минздрава (№ 786н, СанПиН 2.1.3.2630-10), стоматологический кабинет должен соответствовать строгим нормативам по площади, воздухообмену, электробезопасности и инфекционной защите. Однако практика показывает, что до 40% частных кабинетов и поликлиник имеют эргономические недочеты, что приводит к медленной работе персонала и ошибкам в лечении.

Цель – систематизировать современные требования к оснащению и предложить алгоритм выбора оборудования для терапевтического и хирургического стоматологического кабинета.

Базовым документом является регламентирующий основные положения является СанПиН 1.2.3685-21, который регламентирует минимальную площадь кабинета – не менее 14 м² на одну установку плюс 10 м² на каждую дополнительную (7 м² при условии отсутствия бормашины). Высота потолков – от 2,6 м. Обязательны: разводка медицинских газов, автономная система подачи воды с обратным клапаном для исключения перекрестного загрязнения, а также приточно-вытяжная вентиляция с кратностью обмена 4…6 в час.

Эргономическое зонирование включает «грязную» (для отходов класса Б), «чистую» (стерильные столы) и рабочую зону «треугольник»: врач– ассистент–пациент. Ключевой элемент – стоматологическая установка: для терапевта предпочтительны модели с турбинными наконечниками, рассчитанные на скорость от 300 000 – 500 000 оборотов и программируемым креслом с памятью положений; для хирурга – физиодиспенсер для ирригации и коагулятор.

Инфраструктура и дезинфекция кабинета состоят из компрессора с объемом ресивера 30 л и производительностью 70 л/мин (HK-1EW-30 ND-70) и систем аспирации (слюноотсос + хирургический эжектор производительностью не менее 30 л/мин), а также системы водоочистки (бидистиллятор или система обратного осмоса для подачи воды в плевательницу и в остальные узлы стоматологической установки).

Для инфекционного контроля обязательны: два автоклава класс В (Woson TANZO C12) или класса S (Mocom S Classic C17), УФ-рециркулятор воздуха закрытого типа (мощность из расчета 15…20 Вт на 10 м³), а также одноразовые переходники для наконечников.

Современный стоматологический кабинет, занимающийся хирургическими вмешательствами и различными видами имплантов, должен включать:

1. Внутриротовой сканер (например, 3Shape TRIOS или Medit i700) с точностью до 15 микрон – для цифровых слепков при разработке протезов и интеграции с CAD/CAM.

2. Радиовизиограф с дозой облучения в 5 – 10 раз меньше пленочного.

3. Компьютер с DICOM-совместимым ПО (для архивации, телемедицины и планирования имплантации).

Без этих устройств кабинет не соответствует критериям клинической эффективности 3-го уровня (по классификации ВОЗ). Экономически оправданно приобретение сканера при наличии хотя бы 2–3 кабинетов в составе стоматологической сети.

К наиболее частым нарушениям можно отнести:

1. Недостаточное количество инструментальных столов (менее двух на установку) – повышение времени смены инструментов на 40% и уменьшении эффективности работы врачей.

2. Отсутствие коагуляции в хирургическом кабинете, приводящей к риску кровотечений и опасности потери крови.

3. Использование однотипных наконечников для всех манипуляций, приводящих к перекрестной контаминации.

4. Использование недистиллированной воды в работе и стоматологической установке, что повышает риск заражения пациента и также риск поломки стоматологической установки.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Тенденции, которые изменят перспективы отрасли медицинского оборудования / С. В. Фролов, Т. А. Фролова // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы–2022 : сб. тр. XXXV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2022. – С. 292 – 295.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АППАРАТОВ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Н. А. Усенко[1], Т. А. Фролова[2]

[1]МАОУ «Гимназия № 7 имени святителя Питирима, епископа Тамбовского», Тамбов, Россия

[2]Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия (e-mail: frolova2000@gmail.com)

Основные тенденции развития МРТ направлены на повышение доступности, информативности и комфорта [1 – 6].

Прежде всего стоит упомянуть о метаматериалах (рис. 1). Метаматериалы – искусственно созданные материалы, свойства которых определяются не хими-

ческим составом, а формой, геометрией и расположением повторяющихся микроструктур. Главная их особенность – отрицательный коэффициент преломления, что позволяет создавать суперлинзы, которые видят объекты меньше длины световой волны (преодоление так называемого дифракционного предела). Обычный микроскоп не видит детали меньше 200 нм, а металинза теоретически может разглядеть отдельные молекулы. Они способны дать заметный локальный прирост SNR (отношение между амплитудой сигнала, получаемого от исследуемых тканей, и уровнем фонового шума, присутствующего в изображении; чем выше, тем четче изображение), расширить функциональность приемных катушек (беспроводные/носимые, суперлинзы, волноводы) и потенциально снизить время или мощность сканирования для отдельных задач. На данный момент осуществляется переход от лабораторных демонстраций к клинике: нужны дополнительные испытания по безопасности, стабильности и стандартизации.

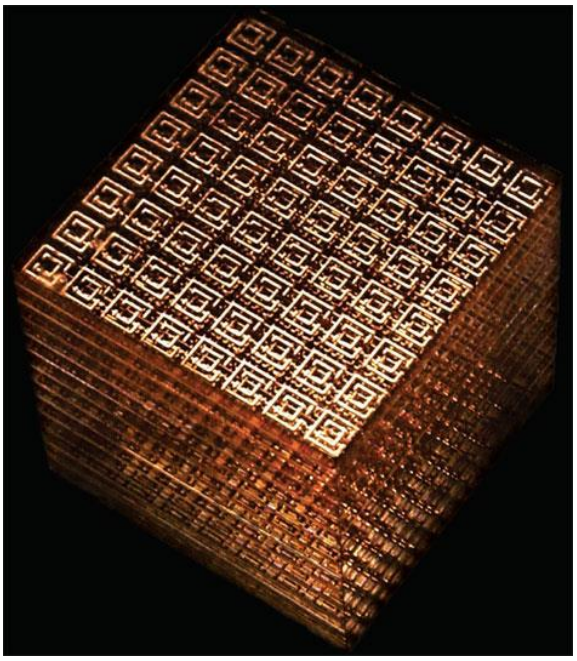


Рис. 1. Метаматериал

Среди других тенденций развития метода можно выделить:

- Искусственный интеллект (ИИ) и автоматизацию.

ИИ внедряется на всех этапах: для планирования исследования, ускорения реконструкции изображений (снижая время сканирования), автоматического выделения патологий и помощи в дифференциальной диагностике. К 2025 году ИИ может стать стандартом в анализе изображений.

- Повышение экологичности и снижение стоимости владения.

Развитие безгелиевых технологий – главный тренд. Это устраняет зависимость от дорогостоящего гелия, упрощает установку и обслуживание томографа. Также акцент делается на снижении энергопотребления (технологии Eco-Power от Siemens).

- Расширение клинических возможностей и гиперполяризацию.

Увеличивается доступность и применение сверхвысокопольных (7 Тл) систем в клинической практике, особенно в нейронауках. Развивается технология гиперполяризации (способ искусственно и временно заставить атомные ядра выстроиться в одном направлении гораздо сильнее, чем это делает природный магнетизм) контрастных агентов, которая может увеличить чувствительность метода на несколько порядков.

- Комфорт пациента и гибридные системы.

Продолжается работа над снижением акустического шума, увеличением апертуры тоннеля, созданием более комфортной среды. Развивается направление гибридных систем, например, МРТ-линейный ускоритель (МРТ-ЛУТ) для точного контроля радиотерапии опухолей в реальном времени.

- Интеграция с облачными технологиями.

Облачные платформы для хранения, обработки данных и телемедицинских консультаций становятся нормой, облегчая обмен данными между врачами и предоставляя пациентам доступ к наглядной информации.

Библиографический список

1. Разбираем магнитно-резонансный томограф II: Метаматериалы в МРТ. – URL : https://habr.com/ru/articles/427897/
2. Лучшие МРТ-аппараты 2026 года: рейтинг, цены, сравнение моделей. – URL : https://tdpuls.com/luchshie-mrt-apparaty-2025-goda-spisok-tseny-sravnenie-modelej/
3. Фролов, С. В. Цветовое картирование одной выбранной скорости в знакопеременных потоках биологических жидкостей с помощью допплеровской оптической когерентной томографии / С. В. Фролов, А. Ю. Потлов, С. Г. Проскурин // Биотехносфера. – 2017. – № 50(2). – С. 11 – 15.
4. Potlov, A. Yu. Tissue-mimicking phantoms of human retina with consideration to blood circulation for Doppler optical coherence tomography / A. Yu. Potlov, S. V. Frolov, S. G. Proskurin // Progress in Biomedical Optics and Imaging – Proceedings of SPIE. – 2020. – V. 11457, art. No. 114571S.
5. Потлов, А. Ю. Визуализация анатомических структур биологических тканей посредством оптической когерентной томографии с морфологической обработкой данных / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, С. Г. Проскурин // Медицинская техника. – 2020. – № 1. – С. 7 – 9.
6. Frolov, S. V. Doppler Mapping of Blood Flow in Soft Biological Tissues Based on Digital Processing of Raw Data Obtained by Real-Time Optical Coherence Tomography / S. V. Frolov, A. Yu. Potlov // Biomedical Engineering. – 2021. – V. 55(2). – P. 79 – 83.

СОВРЕМЕННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Н. А. Усенко[1], Т. А. Фролова[2]

[1]МАОУ «Гимназия № 7 имени святителя Питирима, епископа Тамбовского», Тамбов, Россия
[2]Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: frolova2000@gmail.com)

В 2025 году тройка лидеров – Siemens Healthineers, GE HealthCare и Philips – продолжают определять технологическое развитие отрасли, делая основной упор на интеграцию ИИ во все этапы исследования и повышение экологичности оборудования [1 – 3].

Siemens Healthineers (Германия): в мае 2025 года на конгрессе ESTRO (Европейского общества терапевтической радиационной онкологии) компания представила новую платформу Magnetom Flow RT Pro Edition (рис. 1) – 1,5T систему, оптимизированную для задач лучевой терапии, что подчеркивает тренд на гибридизацию и специализацию оборудования. На конференции RSNA 2025 (Radiological Society of North America) Siemens также анонсировала новые решения с ИИ, например, систему Optiq AI, которая автоматически оптимизирует параметры сканирования и снижает уровень шума при реконструкции изображений.

GE HealthCare (США): компания делает ставку на полную автоматизацию рабочего процесса. На RSNA 2025 была представлена платформа нового поколения Signa, полностью управляемая ИИ. Ключевая разработка – Signa One (рис. 2), которая использует видеотрансляцию для автоматического позиционирования пациента и бесконтактной синхронизации с его дыханием, что упрощает работу оператора и повышает качество изображений. Платформа дебютировала на двух новых аппаратах: Signa Bolt и Signa Sprint.



Рис. 1. Magnetom Flow RT Pro Edition



Рис. 2. Signa One

Philips (Нидерланды): главным достижением Philips в 2025 году стал выпуск первого в мире высокопольного (3,0 Тл) МРТ-сканера, не требующего дозаправки гелием. Система BlueSeal Horizon (рис. 3) была представлена в ноябре 2025 года и использовала фирменную технологию BlueSeal, где несколько литров гелия герметизируются на заводе на весь срок службы аппарата.

Система также активно использует ИИ: функция SmartSpeed Precise ускоряет сканирование в три раза при повышении четкости изображения, а SmartPlanning автоматизирует этапы планирования.

Canon Medical Systems (Япония): компания продолжает развивать направление ИИ. В январе 2025 года Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) одобрило систему Vantage Galan 3T (MRT-3020) (рис. 4) с блоком реконструкции изображений на основе ИИ AiCE. Это подтверждает фокус Canon на улучшение качества изображения и скорости сканирования за счет глубокого обучения.



Рис. 3. BlueSeal Horizon



Рис. 4. Vantage Galan 3T

United Imaging (Китай): китайский производитель демонстрирует впечатляющий рост, успешно конкурируя с глобальными гигантами не только у себя на родине, но и на международных рынках. По данным за первое полугодие 2025 года, United Imaging занял первое место на рынке Китая по объему продаж, обогнав традиционных лидеров. Флагманская модель – uMR Jupiter 5T (рис. 5), первый в мире 5-тесловый томограф для всего тела, получивший одобрение регуляторов США (FDA), Европы (MDR) и Китая (NMPA), что является признанием его технологического совершенства. Компания входит в число ключевых игроков мирового рынка.



Рис. 5. uMR Jupiter 5T

На рынке работают такие компании, как Fonar (США), Esaote (Италия), специализирующиеся на низкопольных и открытых системах, Aspect Imaging (США) с компактными МРТ для неонатологии, Bruker (США) – лидер в области сверхвысокопольных МРТ для научных исследований (доклинические системы), а также производители из Китая, например, Neusoft Medical Systems.

Библиографический список

1. Потлов, А. Ю. Визуализация анатомических структур биологических тканей посредством оптической когерентной томографии с морфологической обработкой данных / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, С. Г. Проскурин // Медицинская техника. – 2020. – № 1. – С. 7 – 9.
2. Frolov, S. V. Doppler Mapping of Blood Flow in Soft Biological Tissues Based on Digital Processing of Raw Data Obtained by Real-Time Optical Coherence Tomography / S. V. Frolov, A. Yu. Potlov // Biomedical Engineering. – 2021. – V. 55(2). – P. 79 – 83.
3. Фролов, С. В. Цветовое картирование одной выбранной скорости в знакопеременных потоках биологических жидкостей с помощью доплеровской оптической когерентной томографии / С. В. Фролов, А. Ю. Потлов, С. Г. Проскурин // Биотехносфера. – 2017. – № 50(2). – С. 11 – 15.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗООБМЕНА МЕЖДУ КРОВЬЮ И ЛЕГКИМИ: ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ ПОДХОДОВ

А. Ю. Ушаков

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: aleksey-ushakov-68@yandex.ru)

В работе представлен обзор математических моделей газообмена O_2 и CO_2 в альвеолярно-капиллярном барьере легких. Рассмотрены стационарные модели диффузии Фика, модели с учетом конечной скорости связывания с гемоглобином и многокомпартментные вентиляционно-перфузионные модели.

Газообмен в легких – ключевой процесс, обеспечивающий насыщение крови кислородом и удаление углекислого газа. Прямые экспериментальные измерения внутри альвеол затруднены, поэтому математическое моделирование является основным инструментом анализа. Цель работы – систематизировать математические подходы от простых аналоговых моделей до многомерных вычислительных гидродинамических моделей (*CFD*).

Моделирование базируется на законе Фика для диффузии через мембрану:

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x}, \qquad (1)$$

где D – коэффициент диффузии (знак «–» указывает направление потока от больших концентраций к меньшим).

Для газов, растворяющихся в крови, используется закон Генри:

$$C = \alpha P, \qquad (2)$$

где α – коэффициент растворимости.

Связывание O_2 с гемоглобином описывается сигмоидной кривой диссоциации (уравнение Хилла):

$$S = \frac{P_{O_2}^n}{P_{50}^n + P_{O_2}^n}, \quad (3)$$

где $n \approx 2{,}7$; P_{50} – парциальное давление полунасыщения.

Модель Райли–Курнана представляет собой вентиляционно-перфузионное отношение, где $\dot{V}_A / \dot{Q}$ – центральный параметр. В двухкомпартментной модели:

$$P_{A,O_2} = P_{I,O_2} - \frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_A}(P_B - 47), \quad (4)$$

где P_B – барометрическое давление. Уравнение переноса O_2 в крови:

$$\dot{Q}(C_{a,O_2} - C_{\bar{v},O_2}) = \dot{V}_{O_2}. \quad (5)$$

Модель диффузионного лимита учитывает конечную скорость диффузии через альвеолярно-капиллярную мембрану. Время капиллярного транзита t_c сравнивается с диффузионным временем $t_d = \delta^2 / D$. При $t_c < t_d$ наступает диффузионный лимит (наблюдается при фиброзе или нагрузке).

Уравнение конвекции-диффузии с источником (связывание с *Hb*):

$$u\frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} = D\frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial x^2} + R(P_{O_2}), \quad (6)$$

где $R(P_{O_2})$ – скорость реакции. Решается методом конечных разностей (схема Кранка–Николсона).

Использование уравнения Навье–Стокса в пористой среде и уравнение переноса газов, показывает, что неоднородность потока ухудшает эффективность газообмена до 15% по сравнению с идеальным случаем.

В результате вычислительного эксперимента была реализована одномерная модель капилляра (длина 500 мкм, диаметр 7 мкм). Граничные условия: P_{V,O_2} = 40 мм рт. ст., P_{A,O_2} = 100 мм рт. ст.

Модель воспроизводит клинические данные пациентов с ХОБЛ с погрешностью не более 5%. Математическое моделирование газообмена в легких эволюционировало от алгебраических уравнений до многомерных *CFD*. Наиболее адекватны гибридные подходы: многокомпартментное описание *VA/Q* и диффузионная коррекция в каждом компартменте. Разработанные модели применяются для оценки эффективности ИВЛ, прогноза гипоксии и тестирования новых респираторных поддержек.

Библиографический список

1. Голов, А. В. Математическая модель регуляции легочной вентиляции при гипоксии и гиперкапнии / А. В. Голов, С. С. Симаков // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – С. 297 – 310.

2. Hoppensteadt, F. Modeling and Simulation in Medicine and the Life Sciences / F. Hoppensteadt, C. Peskin. – 2002.
3. West, J. B. Respiratory Physiology: The Essentials / J. B. West. – 9th ed. – 2016.

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ЭНДОСКОПИЧЕСКОГО МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е. Н. Федотова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: fed0t0vakaterina707@gmail.com)

Современная эндоскопия является одним из наиболее динамично развивающихся направлений медицинского приборостроения [1,2]. Внедрение технологий искусственного интеллекта, роботизированных систем, новых методов визуализации и отечественных разработок в этой области открывает новые возможности для ранней диагностики и малоинвазивного лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта. В работе систематизированы ключевые инновации в эндоскопическом оборудовании.

Разработан первый отечественный эндоскоп с виртуальной хромоэндоскопией.

Ученые СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и ГК «Прометей» создали эндоскоп «Прометей» с четырьмя режимами обработки изображения, включая уникальный режим сохранения естественной цветовой гаммы. По ряду параметров устройство превосходит зарубежные аналоги (Olympus, Storz). Ведется разработка модуля ИИ для диагностики кишечной метаплазии желудка.

Облачная CADe-система CADDIE достоверно повышает выявляемость аденом.

Международное рандомизированное исследование EAGLE Trial (2025) показало, что использование облачной системы компьютерной детекции (Odin Vision/Olympus) увеличивает число аденом на процедуру на 33% (p = 0,01) и в 3,3 раза повышает выявление зубчатых поражений (SSL). Система безопасна и эффективна в рутинной практике.

Новосибирские ученые создают эндоскоп для «оптической биопсии» и плазменной терапии.

При поддержке РНФ разрабатывается устройство, объединяющее многофотонную флуоресценцию (с машинным обучением) и низкотемпературную плазму. Это позволяет выявлять раковые клетки in vivo по биомаркерам и сразу же воздействовать на них, вызывая апоптоз без повреждения здоровых тканей.

Магнитно-управляемый гибкий эндоскоп (MFE) успешно испытан на людях без седации.

Первое в мире клиническое исследование фазы 1 (American Journal of Gastroenterology, 2025) подтвердило безопасность MFE. Устройство управля-

ется внешним роботизированным магнитом. Пациенты в бодрствующем состоянии хорошо переносили процедуру, не отмечая боли или дискомфорта.

В Сеченовском университете создается роботизированный колоноскоп с пятью камерами.

Разработка исключает «слепые зоны» за счет панорамного вывода изображений с пяти камер на один экран. Искусственный интеллект анализирует видеопотоки в реальном времени. Экспериментальный прототип уже создан, выход опытного образца запланирован на 2026–2027 гг.

Мягкий самоходный роботизированный колоноскоп значительно снижает силу воздействия на стенку кишки.

Сравнительное исследование в журнале Gut (2025) показало, что средняя сила при стандартной колоноскопии составляет 1,45…2,82 Н, а при использовании нового мягкого робота – 0,19…0,25 Н. Это позволяет проводить процедуру комфортно.

Анализ инноваций в эндоскопическом оборудовании за 2025 год показывает, что развитие идет по нескольким магистральным направлениям: интеллектуализация диагностики (ИИ-ассистенты, облачные CADe-системы), роботизация и повышение комфорта процедур (магнитно-управляемые и мягкие самоходные роботы, снижающие силу воздействия на стенку кишки), а также совершенствование визуализации (виртуальная хромоэндоскопия, мультиспектральные режимы).

Библиографический список

1. Применение бионического подхода при синтезе систем управления многомерными объектами высокой размерности / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, Т. А. Фролова // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 6. – С. 67 – 70.

2. Фролов, С. В. Тенденции, которые изменят перспективы отрасли медицинского оборудования / С. В. Фролов, Т. А. Фролова // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы–2022 : сб. тр. XXXV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2022. – С. 292 – 295.

ПРИБОРЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИИ

В. А. Фетисов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: vladislavfetisov28@gmail.com)

Заболевания полости рта остаются одной из самых распространенных медицинских проблем в мире. По данным ВОЗ, кариесом зубов страдают около 2,3 миллиарда человек, а заболеваниями пародонта – более 1 миллиарда. Свое-

временная диагностика и качественное лечение этих патологий невозможны без использования современного стоматологического оборудования. Ежегодно в мире проводятся миллионы стоматологических вмешательств, и их эффективность напрямую зависит от технической оснащенности клиник. Современная стоматология предлагает решение: цифровые диагностические системы, высокоскоростные установки и лазерные технологии позволяют проводить лечение с минимальным дискомфортом для пациента и высокой точностью [1, 2].

Система современного стоматологического оборудования включает несколько ключевых компонентов: диагностические аппараты (радиовизиографы, ортопантомографы, КЛКТ), лечебные установки (стоматологические кресла с турбинными и микромоторными наконечниками), эндодонтическое оборудование (апекслокаторы, эндомоторы), стерилизационное оборудование (автоклавы).

Основными мировыми производителями стоматологического оборудования являются: KaVo (Германия); Dentsply Sirona (США/Германия); Planmeca (Финляндия).

В качестве новейших разработок последних лет можно выделить:

– раман-флуоресцентная диагностическая технология (Россия). Аппаратно-программный комплекс «ИнСпектр М» позволяет проводить экспресс-оценку микробной ассоциации, минерализации твердых тканей зубов и выявлять новообразования на ранних стадиях;

– CAD/CAM технологии и 3D-печать. Системы компьютерного проектирования и изготовления стоматологических конструкций (коронок, виниров, имплантатов) непосредственно в стоматологическом кабинете за одно посещение.

В качестве перспектив развития стоматологического оборудования можно отметить применение методов искусственного интеллекта для автоматического анализа рентгеновских снимков и выявления кариеса, кист и других патологий с точностью, превышающей человеческую [3, 4]. Развивается направление портативных диагностических устройств, подключаемых к смартфону для проведения осмотра и консультации в удаленном формате (телемедицина).

Развиваются ультразвуковые датчики нового поколения для диагностики заболеваний десен безболезненным методом с использованием датчика в форме зубной щетки. Активными темпами развивается регенеративная стоматология, направленная на использование стволовых клеток для восстановления тканей зуба, что в перспективе может сделать традиционное пломбирование устаревшим.

Наиболее стремительно развивается сфера 3D-печати и CAD/CAM технологии, что связано с совершенствованием материалов, алгоритмов и снижением стоимости оборудования.

Библиографический список

1. Всемирная организация здравоохранения. Кариес зубов (постоянные зубы) [Электронный ресурс] : информационный бюллетень / ВОЗ. – 2022. – URL : https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dental-caries (дата обращения: 06.05.2026).

2. Раман-флуоресцентная лечебно-диагностическая технология и диапазон ее клинического применения // Dental Press. – 2025. – № 4. – С. 58 – 67.

3. Профилактика и восстановление зубного ряда с использованием 3D-технологии в современной стоматологии / Р. Д. Юсупов, Э. Р. Рубинина, И. В. Азаряев и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2025. – № 4.

4. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

5. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ДЫХАНИИ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

М. В. Шевчук

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: margaeryshevchuk@yandex.ru)

Физиологическая система дыхания человека представляет собой высокоорганизованный многосвязный механизм, обеспечивающий поддержание газового гомеостаза в условиях непрерывно меняющейся метаболической нагрузки, особенно при мышечной деятельности [1, 2].

С позиции теории автоматического управления, дыхательный аппарат человека является системой автоматического управления (САУ) с отрицательной обратной связью, обладающей всеми стандартными компонентами. Структурная схема полученной САУ представлена на рис. 1.

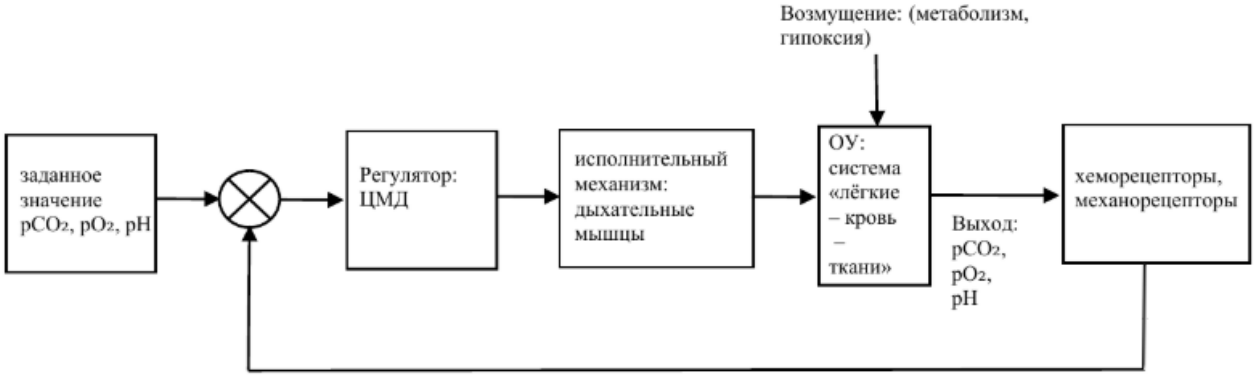


Рис. 1. Дыхание человека в виде системы автоматического управления

Если рассматривать дыхательную систему через призму ТАУ, то:

– регулируемая величина – это парциальное давление CO_2 и O_2, а также pH артериальной крови, причем главный параметр – pCO_2;

– объект регулирования – цепочка «легкие → кровь → ткани», где происходит газообмен и формируется гомеостаз внутренней среды;

– регулятор – центральный дыхательный механизм (ЦДМ) в стволе мозга, обрабатывающий сигналы рецепторов и выдающий управляющую команду;

– управляющее воздействие – альвеолярная вентиляция, зависящая от того, как часто и глубоко мы дышим;

– исполнительный механизм – дыхательные мышцы, превращающие нервные импульсы в механическое движение;

– датчики – центральные и периферические хеморецепторы, а также механорецепторы легких и мышц, создающие обратную связь;

– возмущения – колебания интенсивности обмена веществ, нехватка кислорода во внешней среде и прочие факторы, нарушающие газовое равновесие.

Следовательно, дыхательная система полностью укладывается в классическую структуру САУ [1, 2].

Вопросы применения современных алгоритмов управления для замещения некоторых элементов физиологических систем являются современным трендом в математическом моделировании [3, 4].

Библиографический список

1. Бреслав, И. С. Дыхание и мышечная активность человека в спорте: Руководство для изучающих физиологию человека / И. С. Бреслав, Н. И. Волков, Р. В. Тамбовцева. – М. : Советский спорт, 2013. – 336 с.

2. Бреслав И. С. Как управляется дыхание человека / И. С. Бреслав. – Л. : Наука, 1985. – 160 с. – (От молекулы до организма).

3. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

4. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1(279). – С. 62 – 68.

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ РЕГУЛЯЦИИ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

М. В. Шевчук, А. А. Коробов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: margaeryshevchuk@yandex.ru; korobov1991@mail.ru)

С точки зрения И. С. Бреслава [1, 2], дыхательный аппарат человека можно охарактеризовать как высокоэффективную автоматическую систему регулирования, главное назначение которой – сохранение постоянства «внутренней газовой среды» организма.

Функционирование этой системы строится на двух главных подходах к управлению: регулировании по отклонению (т.е. с использованием отрицательной обратной связи) и опережающей коррекции по внешнему воздействию. Первый из них активируется при выходе pCO_2 или pH за границы физиологической нормы: хеморецепторы фиксируют нарушение, передают сигнал в дыхательный центр, который в ответ меняет вентиляцию легких, возвращая гомеостаз. Второй механизм дает системе возможность заблаговременно повышать вентиляцию – например, сразу после старта мышечной работы, еще до того, как газовый состав крови претерпит сколько-нибудь значительные сдвиги.

Дыхательная система организована иерархически. На низовом автономном уровне нервные структуры ствола головного мозга обеспечивают автоматическую генерацию дыхательного ритма. При необходимости корковые центры могут временно принять управление на себя (произвольное дыхание). Однако устойчивость этой системы не безгранична: при серьезном нарушении гомеостаза автоматические механизмы вновь перехватывают контроль, вне зависимости от волевых усилий человека.

С позиций теории автоматического управления (ТАУ) заслуживает внимания также вопрос об оптимальности и энергетической эффективности дыхательной системы. Как полагает И. С. Бреслав [1, 2], она обладает свойством самооптимизации: непрерывно решает задачу выбора наиболее рационального дыхательного паттерна (т.е. соотношения между частотой и глубиной дыхательных движений) в целях минимизировать затраты энергии и обеспечить максимальную пропускную способность всех звеньев кислородного каскада.

Дыхательная система человека по своему строению и способам функционирования является классической системой автоматического регулирования, в которой присутствуют отрицательные обратные связи, каналы управления по возмущению и иерархическая структура. Применение аппарата ТАУ позволяет дать формальное описание механизмов регуляции дыхания и использовать эти описания для построения математических моделей.

В настоящее время исследование процессов регуляции любых физиологических систем организма становится приоритетным направлением в области математического моделирования [3, 4].

Библиографический список

1. Бреслав, И. С. Дыхание и мышечная активность человека в спорте: Руководство для изучающих физиологию человека / И. С. Бреслав, Н. И. Волков, Р. В. Тамбовцева. – М. : Советский спорт, 2013. – 336 с.

2. Бреслав И. С. Как управляется дыхание человека / И. С. Бреслав. – Л. : Наука, 1985. – 160 с. – (От молекулы до организма).

3. Фролов, С. В. Система поддержки принятия врачебных решений в кардиологии на основе цифрового двойника сердечно-сосудистой системы / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Н. Ветров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 1(40). – С. 3–4.

4. Модель сердечно-сосудистой системы с регуляцией на основе нейронной сети / С. В. Фролов, А. А. Коробов, Д. Ш. Газизова, А. Ю. Потлов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2021. – № 2(38). – С. 79 – 94.

НАДЕЖНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ПСИХИАТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Е. Р. Шелудякова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: sheludyakova_katya@mail.ru)

Дистанционный мониторинг пациентов с психическими расстройствами представляет собой одно из перспективных направлений современной телемедицины. Применение носимых биосенсоров и беспроводных каналов передачи данных позволяет осуществлять непрерывный сбор физиологических параметров – электроэнцефалограммы (ЭЭГ), кожно-гальванической реакции, акселерометрических данных – в условиях повседневной жизни пациента без госпитализации [1]. Вместе с тем беспроводная среда передачи принципиально отличается от проводных клинических систем: она подвержена интерференции, затуханию сигнала и конкурентному доступу нескольких устройств к частотному ресурсу. Следствием этого является неизбежная потеря части пакетов данных в канале. В отличие от потоковых медиаприложений, в медицинских системах каждый утраченный фрагмент данных может нести клинически значимую информацию – признаки эпизода, динамику аффекта, маркеры острого состояния.

Исследования в области беспроводной передачи нейросигналов позволили установить количественные пороги, при которых потери пакетов начинают оказывать клинически значимое воздействие [2]. При уровне потерь менее 2% качество декодирования нейросигнала практически не отличается от эталонного. Начиная с 5%, наблюдается заметная деградация: при этом уровне методами линейной интерполяции удается восстановить 95% эпилептиформных спайков и лишь 81% высокочастотных осцилляций, важных для дифференциальной диагностики [3]. При достижении порога в 10% точность декодирования падает до 73% от исходного значения, что делает автоматическую оценку состояния пациента клинически ненадежной [4, 5].

Не менее важным параметром, чем суммарный процент потерь, является их характер. Последовательные «пачечные» потери (burst loss) приводят к значительно более выраженной деградации диагностического сигнала по сравнению с равномерно распределенными случайными потерями при том же суммарном проценте [2]. Это объясняется тем, что пачечные потери создают протяженные лакуны во временном ряде, которые алгоритмы интерполяции не могут достоверно восстановить [4].

Надежность передачи данных является ключевым инженерным требованием для систем дистанционного психиатрического мониторинга. Проведенный анализ показывает, что клинически достоверным следует считать уровень потерь пакетов не более 2%, тогда как превышение порога в 10% делает автоматическую диагностику недостоверной.

Особую опасность представляют не равномерные случайные потери, а пачечные – характерные для реальной эксплуатации носимых устройств в бытовой радиоэлектромагнитной среде. Эффективным ответом на данную проблему является комбинирование алгоритмов восстановления сигнала, избыточного кодирования и адаптивного управления каналом.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку стандартов допустимого качества канала связи для различных классов психиатрических нозологий с учетом клинической значимости конкретных биомаркеров, передаваемых в составе мониторинговых данных.

Библиографический список

1. Remote Patient Monitoring for Neuropsychiatric Disorders: A Scoping Review / S. Monteith, et al. // Frontiers in Psychiatry. – 2022. – V. 13.

2. Effects of Packet Loss on Neural Decoding Effectiveness in Wireless Transmission / Z. Zhang, et al. // Brain Sciences. – 2025. – V. 15, No. 3. – P. 221.

3. PELP: Accounting for Missing Data in Neural Time Series by Periodic Estimation of Lost Packets / V. Kremen, et al. // Frontiers in Neuroscience. – 2022. – V. 16.

4. Mitigating Effects of Packet Loss in Wireless Neural Data Transfer: Exploring the Influence of Low-Cost Recovery Methods on Spikes and HFOs in iEEG / A. H. Ayyoubi, B. F. Besheli, C. P. Swamy, et al. // Conf Proc (Midwest Symp Circuits Syst). – 2024. – P. 591 – 595.

5. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, К. С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБОР ИММУНОФЕРМЕНТНОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ КЛИНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Т. В. Шестакова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tatyanashestakova15@bk.ru)

Иммуноферментный анализ (ИФА) на сегодняшний день остается одним из наиболее востребованных методов лабораторной диагностики, что обеспечено его высокой чувствительностью, возможностью одновременного тестирова-

ния большого числа образцов и относительной унификацией [1 – 4]. Оснащение клинико-диагностической лаборатории (КДЛ) ИФА-анализатором определяет пропускную способность КДЛ, качество диагностики и эффективность работы на годы вперед. При этом методика выбора оптимальной модели прибора должна учитывать целый комплекс взаимосвязанных требований. Поэтому целью данной работы является анализ ключевых факторов при оснащении КДЛ ИФА-анализатором.

В первую очередь модель ИФА-анализатора определяется реальными объемами работы лаборатории. Для небольшой специализированной лаборатории может быть достаточно 30 – 50 тестов в час, тогда как крупной КДЛ может потребоваться более 200 тестов. Критически важным фактором является не только скорость выполнения тестов, но и возможность непрерывной загрузки срочных образцов в лабораторную информационную систему (ЛИС) без остановки текущей серии анализов.

Помимо производительности и пропускной способности анализатора, важную роль играют его технические характеристики. Среди них следует выделить чувствительность и специфичность, которые характеризуют надежность данного оборудования и определяют клиническую значимость получаемых результатов. Точность дозирования также является ключевой технической характеристикой. Это связано с тем, что даже минимальные отклонения в объеме пробы или реагента могут исказить конечный результат. При этом важно отметить, что системы с одноразовыми наконечниками считаются более предпочтительными, так как обеспечивают исключение перекрестного загрязнения по сравнению с промываемыми иглами. Кроме того, для фотометрических модулей ИФА-анализаторов важны диапазон оптической плотности и набор светофильтров.

К эксплуатационно-экономическим факторам выбора ИФА-анализатора можно отнести стоимость технического обслуживания, включая различные расходные материалы, процедуры калибровки и обучение персонала. Также важна совместимость с различными реагентами. Например, открытые системы позволяют использовать наборы разных производителей, а закрытые – только собственные. Важными факторами являются наличие двусторонней связи с ЛИС, которая ускоряет документооборот и снижает риск ошибок при переносе результатов, и конструкционные параметры, включая габариты и вес.

Следует отметить, что в соответствии с положениями стандарта оснащения КДЛ, для проведения ИФА-исследований требуется не только сам анализатор, но и автоматическое устройство для промывки планшетов, термостат для планшетов, дозаторы лабораторные, компьютерное обеспечение для учета результатов анализов и ряд другого вспомогательного оборудования. Это необходимо учитывать при формировании полного перечня закупок.

На основании результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что оптимальный выбор ИФА-анализатора для КДЛ является комплексной задачей, требующей системного подхода. Ключевые параметры выбора включают производительность, соответствующую реальной нагрузке лаборатории,

степень автоматизации, достаточную для сокращения ручного труда, аналитическую точность и совместимость с имеющимися реагентами, экономическую эффективность с учетом полной стоимости владения, а также соответствие установленным стандартам оснащения. Только учет всех этих факторов в их взаимосвязи позволяет оборудовать КДЛ современным, надежным и экономически оправданным оборудованием, способным обеспечить высокое качество лабораторной диагностики.

Библиографический список

1. Попов, И. А. Проблемы технического оснащения клинико-диагностической лаборатории медицинского центра / И. А. Попов, Т. А. Фролова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 2-х ч., Гомель, 24–25 апреля 2025 года. – Гомель : Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, 2025. – С. 172 – 174.

2. Применение бионического подхода при синтезе систем управления многомерными объектами высокой размерности / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Ю. Потлов, Т. А. Фролова // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 6. – С. 67 – 70.

3. Севодина, А. Н. Оснащение клинико-диагностической лаборатории центра превентивной медицины / А. Н. Севодина, Т. А. Фролова // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2021. – С. 346 – 350.

4. Фролова, Т. А. Разработка информационной модели на примере гематологических анализаторов / Т. А. Фролова, А. Н. Севодина // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – С. 283–284.

КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ

С. Р. Штыркова, Е. П. Долгов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Sudakov.dima1702@yandex.ru)

Современные аппараты ИВЛ предлагают широкий спектр режимов вентиляции – от принудительных (CMV, VCV, PCV) до вспомогательных (SIMV, PSV) и интеллектуальных (ASV, NAVA, VAPS). Выбор оптимального режима требует учета множества параметров: механики дыхания, газообмена, активности пациента и гемодинамики. Отсутствие единой классификации и формали-

зованных критериев выбора затрудняет обучение специалистов и разработку интеллектуальных СППР.

Проведен анализ технической документации и клинических руководств. Режимы классифицированы по принципу управления и степени автоматизации. На рисунке 1 представлена иерархия режимов ИВЛ: от принудительных (CMV, VCV, PCV) через вспомогательные (SIMV, PSV) к адаптивным и замкнутым системам (ASV, NAVA, IntelliVent-ASV).



Рис. 1. Иерархия режимов ИВЛ

Предложена трехуровневая классификация: 1-й уровень – поддержание заданного объема (MMV, VAPS, VS); 2-й уровень – адаптация к пациенту (PAV, NAVA, ATC, ASV); 3-й уровень – полная автоматизация (IntelliVent-ASV).

Формализованы четыре группы параметров:

- Механика легких: Cst 50…100 мл/см H_2O, снижение < 40 – рестрикция; Raw < 5 см H_2O/л/с, > 10 – удлинить выдох; Pplat < 30 см H_2O; ΔP < 15 см H_2O; P0.1 0,5…2 см H_2O, > 6 – риск утомления.
- Газообмен: P/F < 300 – ОРДС, < 200 – средний, < 100 – тяжелый; $PaCO_2$ > 50 мм рт. ст.; SpO_2 88…95%.
- Активность пациента: ЧД > 35/мин – риск утомления, отсутствие триггеров – CMV, асинхронии – коррекция.
- Гемодинамика: АД сист. < 90 мм рт. ст. на фоне высокой PEEP – снизить PEEP.

Для практической реализации интеллектуальной поддержки предложенные пороговые значения могут быть использованы в продукционных правилах. Такие правила легко встраиваются в базы знаний СППР.

Предложенная классификация и формализация создают основу для построения продукционной базы знаний и алгоритмов выбора режимов ИВЛ. Они могут использоваться как для обучения врачей, так и для разработки интеллектуальных СППР с объяснимым искусственным интеллектом.

Предложенная классификация и формализация параметров создают основу для построения продукционной базы знаний и алгоритмов выбора режимов ИВЛ. Они могут быть использованы как для обучения врачей, так и для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Совместное использование методов функциональной диагностики и математического моделирования сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным пороком сердца / С. В. Фролов, Д. Е. Судаков // Российский кардиологический журнал. – 2024. – Т. 29, № S7. – С. 44.
2. Система поддержки принятия врачебных решений для ранней диагностики детей с дефектом межжелудочковой перегородки / С. В. Фролов, Д. Е. Судаков, А. А. Коробов, Д. Г. Старых // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2026. – Т. 29, № 1. – С. 18 – 23.

ФАКТОРЫ НЕОБХОДИМОСТИ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМОВ ИВЛ

С. Р. Штыркова, Е. П. Долгов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Sudakov.dima1702@yandex.ru)

Искусственная вентиляция легких (ИВЛ) является основным методом интенсивной терапии острой дыхательной недостаточности. По данным научных источников, от 30 до 50% пациентов отделений реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ) нуждаются в респираторной поддержке, а летальность при тяжелом ОРДС достигает 30…40%. Современные аппараты ИВЛ оснащены десятками режимов вентиляции и более чем 50 настраиваемыми параметрами, что создает высокую когнитивную нагрузку на врача, особенно в условиях дефицита времени (одновременное ведение 6 – 12 пациентов). Ошибки при выборе режима приводят к вентилятор-ассоциированным повреждениям легких (ВАПЛ): баротравме, волюмотравме, ателектотравме, биотравме (рис. 1). Каждый дополнительный день ИВЛ увеличивает риск вентилятор-ассоциированной пневмонии на 1…3%. В связи с этим актуальна разработка систем поддержки принятия врачебных решений (СППР), интегрирующих данные о механике дыхания, газообмене, активности пациента и гемодинамике.

Проведен анализ научных публикаций в базах PubMed, eLibrary, Scopus, клинических рекомендаций Минздрава РФ и Федерации анестезиологов-реаниматологов, а также технической документации аппаратов ИВЛ (Dräger, Hamilton Medical, GE Healthcare, «Авента-М»).

Выделены три группы факторов, обосновывающих необходимость СППР: клинические (сложность интерпретации механики дыхания, гетерогенность поражения легких при ОРДС, высокая частота осложнений – баротравма у 10…15% пациентов при Pplat > 30 см H_2O), организационные и технические (отсутствие встроенных баз знаний, работа коммерческих систем как «черного ящика»).

В смежных областях медицины СППР успешно применяются, однако в респираторной терапии их внедрение ограничено. Успешность внедрения СППР при интерпретации ЭКГ превышает 95%, в то время как для выбора режима ИВЛ она остается низкой. Причины: высокая динамика состояния пациента, сложность формализации клинических паттернов, отсутствие валидированных баз знаний. Существующие коммерческие системы функционируют как «черный ящик», не объясняя логику рекомендаций, и не адаптированы к российским клиническим рекомендациям.

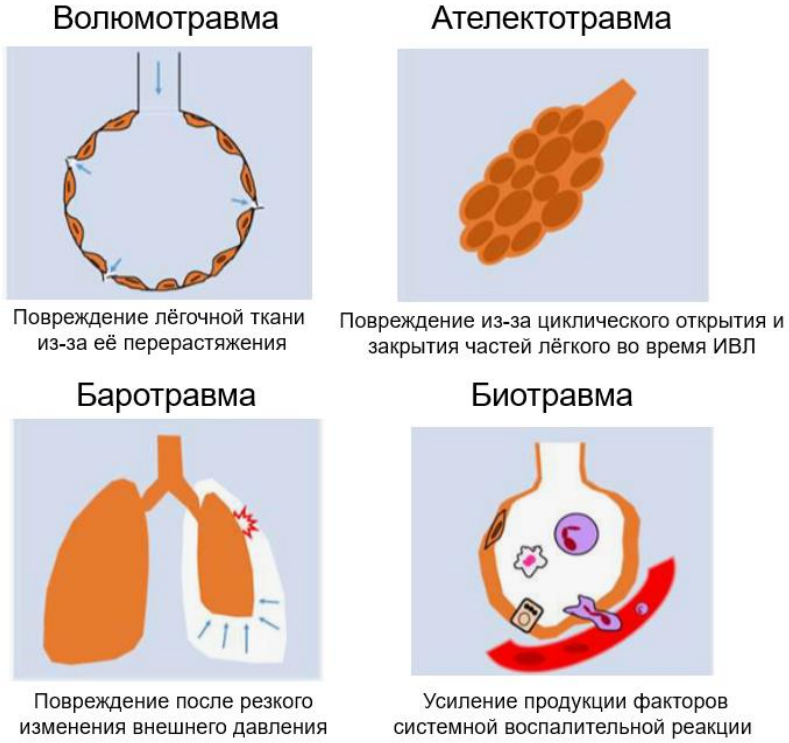


Рис. 1. Схема видов вентилятор-ассоциированных повреждений легких

Сложность и высокая динамика процесса выбора режима ИВЛ, а также когнитивная нагрузка на врача обосновывают необходимость разработки СППР. При этом создаваемая система должна обеспечивать прозрачность и объяснимость рекомендаций, а также учитывать отечественные клинические рекомендации.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Совместное использование методов функциональной диагностики и математического моделирования сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным пороком сердца / С. В. Фролов, Д. Е. Судаков // Российский кардиологический журнал. – 2024. – Т. 29, № S7. – С. 44.

2. Система поддержки принятия врачебных решений для ранней диагностики детей с дефектом межжелудочковой перегородки / С. В. Фролов, Д. Е. Судаков, А. А. Коробов, Д. Г. Старых // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2026. – Т. 29, № 1. – С. 18 – 23.

НАСТОЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР УСЛОВИЙ СНА

И. В. Щеголев, В. С. Бессонова

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(e-mail: ivansegodev@gmail.com; lera.bessonova.0303@mail.ru)

Бессонница (инсомния) – расстройство сна, которое характеризуется нарушением процесса засыпания и поддержания сна в течение продолжительного времени. В результате отмечается дефицит количества и качества сна, необходимых для нормальной жизнедеятельности человека.

Данный прибор призван помочь людям, страдающим инсомнией (бессонницей). Данный прибор оснащен датчиками температуры, давления и уровня углекислого газа. Вывод информации осуществляется на небольшой OLED экран, также выводится текстовый результат анализа условий окружающей среды. Прибор даст совет о проветривании помещения в целях понижения температуры и циркуляции свежего воздуха, уведомит о слишком сухом/влажном воздухе. Прибор является самостоятельной аппаратурой, не требует подключения к системе «Умного дома» и может использоваться как в домашних условиях, так и в условиях медицинского учреждения [1]. Блок-схема данного устройства представлена на рис. 1.

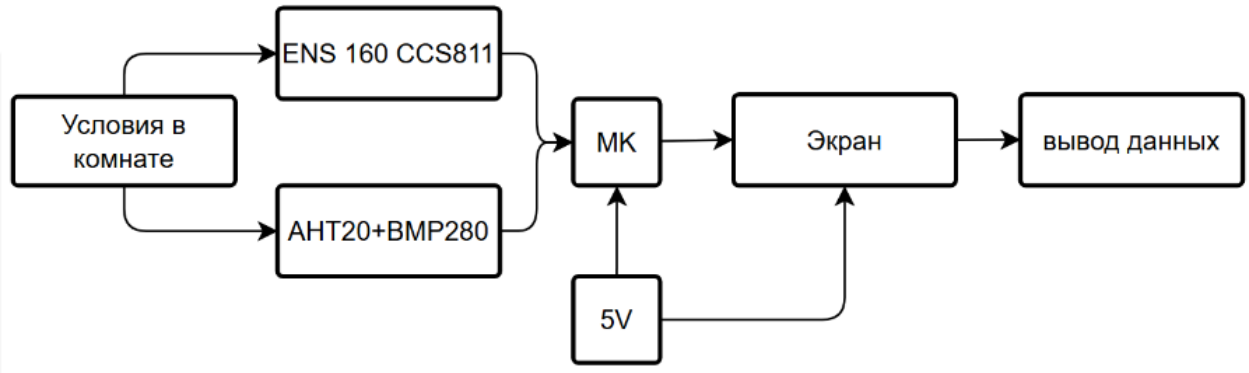


Рис. 1. Блок-схема

Для реализации требуются следующие компоненты: Arduino nano/Arduino uno, датчик температуры и газа ENS160 CCS811, OLED модуль 0,96 дюйма AITEWIN ROBOT 128x64, датчик температуры, влажности и давления воздуха AHT20 + BMP280. Из прочих расходных материалов: провода, резисторы, пластмасса для 3D-принтера. Далее будут представлены схемы подключения отдельных компонентов к Arduino (рис. 2).

Ориентировочная стоимость компонентов и готового изделия представлена в табл. 1. Окончательная цена может отличаться в зависимости от ценообразования компонентов и наличия расходных материалов.

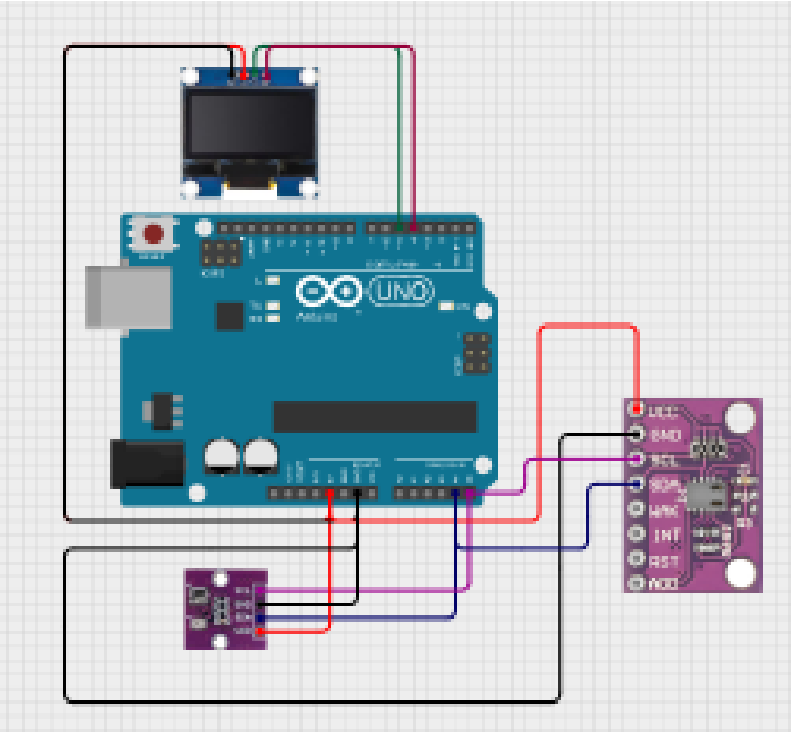


Рис. 2. Модульная схема

1. Закупочная цена компонентов

Компонент	Цена (руб.)
Arduino nano	216
CCS811+ENC160	332
AITEWIN ROBOT 128x64	102
AHT20 + BMP280	48
Итоговая стоимость: ~698 руб.	

Данный прибор уже был испытан лично и дал позитивный опыт использования, подготовка комнаты ко сну сократила время засыпания и облегчила пробуждение по утрам. За счет простоты использования, реализации и понятного интерфейса данный прибор можно применять в широких массах.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Тенденции, которые изменят перспективы отрасли медицинского оборудования / С. В. Фролов, Т. А. Фролова // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы–2022 : сб. тр. XXXV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2022. – С. 292 – 295.

Секция 4
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА СО СЛЕДЯЩИМ ФИЛЬТРОМ С АВТОНАСТРОЙКОЙ

Е. А. Антонов, С. П. Москвитин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: e.a-nov98@mail.ru; moskvitin.sp@tstu.ru)

Ввиду технического развития современных летательных аппаратов, расширения областей применения БПЛА, увеличения автоматизации процессов и многих других факторов традиционные способы радиолокации не всегда эффективны.

Для оптимизации процессов в области обнаружения и сопровождения воздушных целей была разработана информационно-измерительная система (ИИС), в состав которой входят: радиодальномер, радиоугломер, телевизионный измеритель, тепловизионный измеритель, база данных, блок идентификации, блок комплексирования, следящий фильтр.

Данная ИИС при наличии объекта в поле обзора получает информацию о дальности до объекта, его угловых координатах и составляющих его вектора скорости с радиодальномера и радиоугломера. Теле- и тепловизионные измерители передают синхронизированные по времени кадры в блок комплексирования, в котором из полученных кадров выделяется объект, определяются его характерные признаки. Комплексированные данные передаются в блок идентификации, который на основе комбинации методов идентификации объектов на изображении ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [1], PnP (Perspective-n-Points) [2] и Multi-RANSAC (Multiple Random Sample Consensus) определяет тип и модель объекта наблюдения. Следующим этапом ИИС получает из базы данных необходимые для расчета тактико-технические характеристики (максимальная скорость, допустимая перегрузка, скороподъемность и т.д.). В результате расчета объема возможных отклонений объекта наблюдения в пространстве ИИС получает необходимые значения для настройки следящего фильтра.

На практике наибольшее распространение в качестве модели движения объекта получили альфа-бета и альфа-бета-гамма-фильтры, а также упрощенные фильтры Калмана. Однако, как показывают исследования, траектории большинства летательных аппаратов содержат существенную гармоническую составляющую [3]. Поэтому представляется целесообразным применять в качестве модели движения цели модель в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -2ax_2 - b^2 x_1, \end{cases}$$

где a и b – постоянные коэффициенты, характеризующие основную частоту звена и затухание соответственно.

Именно эти коэффициенты определяются в результате расчета информационно-измерительной системой на основе ТТХ идентифицированного объекта наблюдения.

В тех случаях, когда системе не удается точно определить модель воздушной цели, блок идентификации сокращает эту задачу до определения класса объекта: объект самолетного типа, объект вертолетного типа, объект мультироторного типа, аэростатический объект. Тогда настройка следящего фильтра происходит на основе усредненных ТТХ внутри одного класса.

Благодаря алгоритму идентификации объекта наблюдения и расчета на основе его ТТХ следящий фильтр получает оптимальные настройки. Математическое моделирование синтезированного фильтра показало высокую точность оценки параметров движения объекта наблюдения. В некоторых случаях среднеквадратичная величина погрешности оценки дальности до цели у синтезированного фильтра была в разы меньше, чем у классического фильтра Калмана [4].

Таким образом, разработанная информационно-измерительная система позволяет повысить точность оценки траектории воздушных целей, что в свою очередь решает задачи обеспечения безопасности воздушного пространства, увеличения пропускной способности аэропортов, автоматизации вторичной обработки информации.

Библиографический список

1. Mur-Artal, R. ORB-SLAM: Tracking and mapping recognizable features / R. Mur-Artal, J. D. Tardós // MVIGRO Workshop at Robotics Science and Systems (RSS). – Berkeley, USA, 2014.

2. Zheng, Y. Revisiting the PnP problem: A fast, general and optimal solution / Y. Zheng, Y. Kuang, S. Sugimoto, et al. // Computer Vision (ICCV), 2013 IEEE International Conference on. – Piscataway : IEEE, 2013. – P. 2344 – 2351.

3. Льюнг, Л. О точности модели в идентификации систем / Л. Льюнг // Техническая кибернетика. – 1992. – № 6. – С. 55 – 63.

4. Антонов, Е. А. Исследование чувствительности и точности следящего фильтра с моделью на основе звена второго порядка / Е. А. Антонов, С. Н. Данилов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 51 – 58.

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ ОПОВЕЩЕНИЯ ГРАЖДАН О ПРИБЛИЖЕНИИ БПЛА

Н. Д. Долгих, А. И. Сукачев

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
(e-mail: kitd2004@mail.ru)

С каждым годом использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится более массовым. При этом их используют не только в мирных целях, для отслеживания очагов возгорания лесных пожаров или в сельском хозяйстве [1], но и для совершения противоправных и террористических действий.

На данный момент существуют только государственные системы оповещения граждан о приближении ударных БПЛА. Оповещение осуществляется через СМС-сообщения или с помощью сирен. Данный подход является эффективным для обеспечения безопасности граждан при террористических действиях с применением более крупного и заметного вооружения, авиационных бомб и ракет с большим радиусом поражения. При этом атаки с использованием БПЛА имеют более локальный характер. Еще одним аспектом, выделяющим БПЛА, является тот факт, что их трудно обнаружить радиолокационными методами, так как большинство БПЛА летят в режиме радиомолчания и сделаны из композитных материалов. Таким образом, одним из эффективных методов обнаружения является акустический [2]. Но и у данного метода есть свои недостатки, главным из которых является дальность обнаружения.

Возвращаясь к вопросу информирования граждан, возникает необходимость информировать большую территорию: не конкретный городской район, который будет подвергнут атаке, а целый город или, в отдельных случаях, всю область, для обеспечения безопасности граждан. При этом, в случае реальной опасности, в отдельной части города вторая часть города находится в неведении, что со временем формирует неоднозначное отношение граждан к реальной угрозе. А именно, многие граждане перестают серьезно относиться к оповещениям об опасности. В связи с этим возникает необходимость разработки системы локального обнаружения и точечного оповещения граждан о приближении БПЛА.

Следует отметить, что данная система должна в автономном режиме анализировать акустический профиль местности и во время обнаружения акустических сигнатур БПЛА точечно, в небольшом радиусе, оповещать граждан о его приближении.

В общем виде устройство, позволяющее обнаружить и оповестить граждан, должно состоять, минимум, из двух блоков: блока обнаружения и блока оповещения. Блок обнаружения состоит из нескольких чувствительных микрофонов, вычислителя и телекоммуникационного модуля. Блок оповещения

состоит из тех же модулей, только вместо микрофонов в нем устанавливаются системы светового и звукового оповещения граждан. Данная система должна:

1) обрабатывать данные с микрофонов в реальном времени, для чего ей необходимы значительные вычислительные мощности;

2) иметь малые габаритные размеры для возможности закрепления в различных условиях;

3) иметь невысокую стоимость.

Учитывая вышеизложенные требования, устройство должно строиться на микроконтроллере, имеющем массовое распространение, и использовать комплектующие находящиеся в свободной продаже. В качестве примера можно использовать микроконтроллеры серии STM32 или ESP32. В качестве сенсорной компоненты рационально использовать МЕМС-микрофоны ICS43434, так как они обладают низким энергопотреблением (490 мкА) в рабочем режиме), высокой устойчивостью к электромагнитным помехам и широким диапазоном частот (60 Гц…20 кГц).

Библиографический список

1. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Ю. Н. Зубарев и др. // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2019. – № 2. – С. 47 – 51.

2. Использование акустических средств для борьбы с дронами в УИС / Р. В. Кузьменко, А. В. Кудрин, Р. Е. Поздняков, А. И. Сукачев // Актуальные проблемы деятельности подразделений уголовно-исполнительной системы : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 23 октября 2025 года. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», Федеральное казенное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний России», 2025. – С. 45 – 50.

КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ В СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А. В. Иванов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: Aleksandr-ivanov68@yandex.ru)

Бортовое оборудование современных подвижных объектов для определения координат местоположения, параметров движения и пространственного положения продольных осей объекта включает навигационные комплексы (НК). Основу современных навигационных комплексов подвижных объектов, в том числе и наземных, составляет аппаратура приема (АП) радиосигналов

спутниковых радионавигационных систем (СРНС) типа NAVSTAR GPS, ГЛОНАСС, Галилео (Galileo), Бэйдоу (BeiDou). Аппаратура приема радиосигналов СРНС позволяет обеспечивать высокую точность определения координат местоположения подвижного объекта и параметров его движения путем коррекции счисленных координат местоположения объекта. Однако ее применение в составе навигационного комплекса имеет существенный недостаток, связанный с тем, что в произвольный момент времени на точность выходных данных АП СРНС существенное влияние оказывают ошибки, возникающие при выполнении процедуры измерений. Измерения становятся искаженными (аномальными). Основная причина возникновения ошибок измерения, малое отношение сигнал/шум на входе АП сигналов СРНС, что обусловлено влиянием на входной радиосигнал АП СРНС канала распространения, а также радиопомех естественного и искусственного происхождения. При работе АП СРНС в режиме слежения в дискриминационном устройстве при малых отношениях сигнал/шум в пределах линейного или близкого к линейному участку дискриминационной характеристики возможен захват шумовых выбросов радиосигнала, что и приводит к появлению аномальных измерений. При этом закон распределения захвата шумовых выбросов, а, следовательно, и формирования аномальных распределений является равномерным [1].

Для синтеза алгоритмов обработки информации в НК широкое распространение получили методы марковской теории оптимального оценивания случайных процессов, позволяющие получить оптимальные алгоритмы обработки [2 – 4]. Разработанные этими методами комплексные алгоритмы позволяют обеспечить высокую точность определения текущих координат местоположения и параметров движения объекта за счет совместной обработки информации, а также обеспечить несколько режимов работы НК, что повышает его надежность.

Полагаем, что в состав НК подвижного объекта входят: инерциальная навигационная система (ИНС); *M*-канальная аппаратура приема радиосигналов СРНС и барометрический высотомер (БВ). Определять координату местоположения и параметры движения объекта в вертикальной плоскости (вертикальный канал) и горизонтальной плоскости (горизонтальный канал) будем выполнять в нормальной земной системе координат $OX_gY_gZ_g$, начало которой удалено от центра Земли на величину R_0, и в которой положение объекта определяется координатами x, y, z. Считаем, что ось OX_g направлена на север, ось OY_g – на восток, ось OZ_g – вверх по местной вертикали, и в начальный момент времени t_0 объект имеет координаты x_0, y_0, z_0. Подлежащий оцениванию вектор состояния, характеризующий положение объекта и скорость изменения этого положения во времени, в вертикальной плоскости включает четыре компоненты $\mathbf{X}_B(t_k) = [H_{OTH}(t_k), V_Z(t_k), \Delta H(t_k), \Delta_{aZ}(t_k)]^T$, а в горизонтальной плоскости включает шесть компонент $\mathbf{X}_\Gamma(t_k) = [x(t_k), y(t_k), V_X(t_k), V_Y(t_k), \Delta_{aX}(t_k), \Delta_{aY}(t_k)]^T$.

Методами марковской теории оптимального оценивания по критерию максимума дисперсии ошибки оценивания в работе [5] были получены алго-

ритмы комплексной оптимальной обработки информации в навигационных комплексах, для вертикального канала:

$$\mathbf{X}^*_B(t_{k+1}) = \mathbf{\Phi}_{xxB}(t_{k+1},t_k)\mathbf{X}^*_B(t_k) + \mathbf{\Psi}_B(t_{k+1},t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \mathbf{K}_1(t_{k+1})[\xi_1(t_{k+1}) - \varphi_{uu}(t_{k+1},t_k)\xi_1(t_k) -$$
$$- \mathbf{H}_1(t_{k+1})\mathbf{\Psi}_B(t_{k+1},t_k)\mathbf{W}_B(t_k) + \varphi_{uu}(t_{k+1},t_k)\mathbf{H}_1(t_k)\mathbf{X}^*_B(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\mathbf{\Phi}_{xxB}(t_{k+1},t_k)\mathbf{X}^*_B(t_k)] +$$
$$+ \mathbf{K}_2(t_{k+1})[\xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\mathbf{\Psi}_B(t_{k+1},t_k)\mathbf{W}_B(t_k) - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\mathbf{\Phi}_{xxB}(t_{k+1},t_k)\mathbf{X}^*_B(t_k)], \quad (1)$$

где $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$ и $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$ вектор-столбцы размером (4×1) матрицы оптимальных коэффициентов передачи $\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}) \vdots \mathbf{K}_2(t_{k+1})]$, и для горизонтального канала:

$$\mathbf{X}^*_\Gamma(t_{k+1}) = \mathbf{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1},t_k)\mathbf{X}^*_\Gamma(t_k) + \mathbf{\Psi}_\Gamma(t_{k+1},t_k)\mathbf{W}_\Gamma(t_k) +$$
$$+ \mathbf{K}_{\Gamma1}(t_{k+1})\left[\mathbf{\Xi}_{\Gamma1}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma1}(t_{k+1})\mathbf{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1},t_k)\mathbf{X}^*_\Gamma(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma1}(t_{k+1})\mathbf{\Psi}_\Gamma(t_{k+1},t_k)\mathbf{W}_\Gamma(t_k)\right] +$$
$$+ \mathbf{K}_{\Gamma2}(t_{k+1})\left[\mathbf{\Xi}_{\Gamma2}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma2}(t_{k+1})\mathbf{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1},t_k)\mathbf{X}^*_\Gamma(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma2}(t_{k+1})\mathbf{\Psi}_\Gamma(t_{k+1},t_k)\mathbf{W}_\Gamma(t_k)\right]. \quad (2)$$

Полученные алгоритмы представляют собой рекуррентные соотношения, позволяющие оценивать координаты местоположения и параметры движения подвижного объекта в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Рассмотрим применение методов математической статистики для определения закона распределения векторов невязок измерений в алгоритмах оценивания координат местоположения подвижного объекта в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

В выражение (1) для оптимальной оценки вектора состояния входит невязка измерений по измерениям СРНС, имеющая вид

$$\varepsilon_{B2}(t_{k+1}) = \xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\mathbf{\Psi}_B(t_{k+1},t_k)\mathbf{W}_B(t_k) - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\mathbf{\Phi}_{xxB}(t_{k+1},t_k)\mathbf{X}^*_B(t_k). \quad (3)$$

В стационарном режиме работы обновляемая последовательность представляет собой белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией

$$\sigma^2_\varepsilon(t_{k+1}) = M[\varepsilon^2_{B2}(t_{k+1})] =$$
$$= \mathbf{H}_2(t_{k+1})\mathbf{\Phi}_{xxB}(t_{k+1},t_k)\mathbf{P}_B(t_k)\mathbf{\Phi}^T_{xxB}(t_{k+1},t_k)\mathbf{H}^T_2(t_{k+1}) + \Gamma_2(t_{k+1})\Gamma_2(t_{k+1}). \quad (4)$$

Естественно предполагать, что если закон распределения обновляемой последовательности не является гауссовским, то измерения на выходе АП СРНС являются аномальными. Для проверки закона распределения используем методы математической статистики [6]. В соответствии с данными методами на временном интервале длительностью $\Delta T = N \times (t_{k+1} - t_k)$ возьмем N выборок обновляемой последовательности $\{\boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_k), \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+1}), ..., \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, ...$. Найдем максимальное $\boldsymbol{\varepsilon}_{B2\max}$ и минимальное $\boldsymbol{\varepsilon}_{B2\min}$ значения из совокупности полученных N выборок обновляемой последовательности $\{\boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_k), \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+1}), ..., \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, ...$. Таким образом, значения выбо-

рок обновляемой последовательности будут лежать на отрезке $[\boldsymbol{\varepsilon}_{B2\min}, \boldsymbol{\varepsilon}_{B2\max}]$. Определим величину разброса N случайных величин, входящих в выборку обновляемой последовательности,

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{B2} = \left|\boldsymbol{\varepsilon}_{B2\max} - \boldsymbol{\varepsilon}_{B2\min}\right|.$$

Разобьем величину разброса $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{B2}$ случайных величин на r «ячеек» группирования. Минимально выбираемое значение величины r – количества «ячеек» группирования зависит от количества N выборок обновляемой последовательности и приведено в [6]. Размер «ячейки» группирования будет определяться величиной $\delta\boldsymbol{\varepsilon} = \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{B2} / r$.

Найдем количество n_i, $i = \overline{1,r}$ случайных величин выборки обновляемой последовательности $\{\boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_k), \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+1}), ..., \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, ...$, попавших в каждую «ячейку» группирования и рассчитываем относительную частоту $\nu_i = n_i / N$ попадания выборок в соответствующие «ячейки» группирования.

Для проверки того, что закон распределения выборок обновляемой последовательности $\{\boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_k), \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+1}), ..., \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, ...$ является гауссовским, используем критерий χ^2 (хи-квадрат) Пирсона. В соответствии с данным критерием за меру расхождения, полученным по результатам выборки относительных частот ν_i и предполагаемого нами теоретического гауссовского закона распределения, примем величину [6]

$$\chi^2 = N\sum_{j=1}^{r}\frac{(\nu_j - P_j)^2}{P_j}, \qquad (5)$$

где P_j – вероятность нахождения случайной величины в пределах j-й, $j = \overline{1,r}$ «ячейки» группирования, вычисленная для теоретического гауссовского закона распределения

Задаемся доверительной вероятностью $P\{\chi^2 > \chi^2_\alpha\} = \alpha$. Обычно значение уровня значимости α имеет значение порядка $\alpha = 0{,}05$ или $\alpha = 0{,}01$. Для выбранной доверительной вероятности определяем доверительную границу χ^2_α из уравнения

$$P\{\chi^2 > \chi^2_\alpha\} = \int_{\chi^2_\alpha}^{\infty} p_{\chi^2}(x)dx, \qquad (6)$$

где p_{χ^2} – плотность вероятности χ^2 (хи-квадрат) со степенями свободы $m = r - 3$.

Если полученное значение величины χ^2 меньше доверительной границы χ^2_α

$$\chi^2 < \chi^2_\alpha, \qquad (7)$$

то совокупность случайных величин распределена по гауссовскому закону, а это значит, что аномальных измерений на выходе АП СРНС нет, так же как отсутствуют другие факторы, обеспечивающие искусственное изменение псевдодальности по линейному или другому закону.

Структурная схема обработки информации для вертикального канала, синтезированная в соответствии с алгоритмом (1), (3) – (7), представлена на рис. 1. В состав структурной схемы обработки информации входят сумматоры, усилители, ключевые устройства и линии задержки. Отличительной особенностью предложенной схемы обработки информации является возможность выявления аномальных измерений методом математической статистики. С этой целью в состав схемы введены: схема вычисления χ^2; схема вычисления χ^2_α; пороговое устройство (ПУ) и ключевое устройство (КУ). Для вычисления значения χ^2 на схему вычисления χ^2 поступает N выборок обновляемой последовательности $\{\boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_k), \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+1}), ..., \boldsymbol{\varepsilon}_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \ldots$. Для вычисления значения доверительной границы χ^2_α на схему вычисления χ^2_α подаются значения уровня значимости α и значение количества «ячеек» группирования r. Пороговое устройство обеспечивает сравнение величин χ^2 и χ^2_α. Если выполняется условие, что значение χ^2 равно или превышает значение порога, в качестве которого используется значение χ^2_α, то выдается сигнал на ключевое устройство. В этом случае ключевое устройство не пропускает обновляемую последовательность (невязку измерений), сформированную по измерениям СРНС для формирования оценки $\mathbf{X}^*_B(t_{k+1})$, считается, что измерения СРНС являются аномальными.

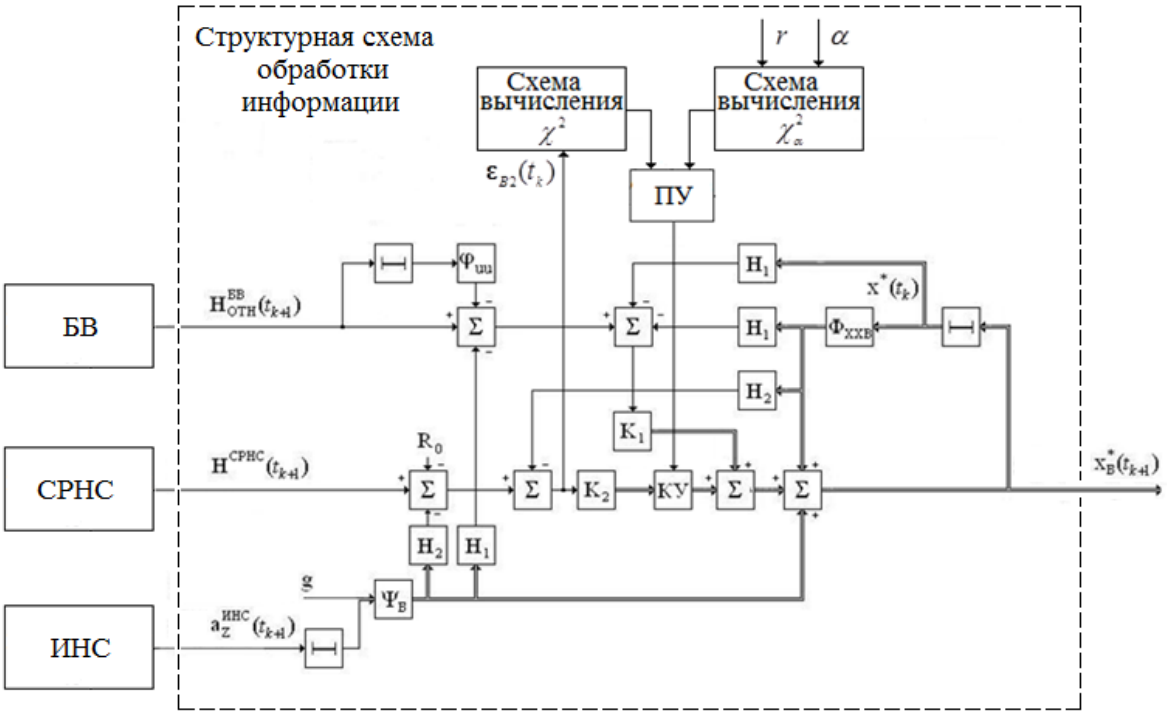


Рис. 1

В горизонтальном канале невязка измерений по измерениям СРНС имеет вид

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) = \boldsymbol{\Xi}_{\Gamma 1}(t_{k+1}) - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})\boldsymbol{\Phi}_{xx\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}^*_{\Gamma}(t_k) - \mathbf{H}_{\Gamma 1}(t_{k+1})\boldsymbol{\Psi}_{\Gamma}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_{\Gamma}(t_k). \quad (8)$$

Проделав те же действия, получим структурную схему обработки информации в навигационных комплексах подвижных объектов для горизонтального канала (рис. 2). В состав структурной схемы обработки информации входят сумматоры, усилители и линии задержки. Отличительной особенностью предложенной схемы обработки информации является наличие системы контроля в виде платы выявления аномальных измерений на выходе АП сигналов ГНСС, которая обеспечивает выявление аномальных измерений по критерию хи-квадрат Пирсона и исключение из обработки информации этих аномальных измерений. С этой целью в состав платы введены: схема вычисления χ^2_x; схема вычисления χ^2_y; схема вычисления χ^2_α; два пороговых устройства (ПУ), схема суммирования и схема принятия решения (СПР).

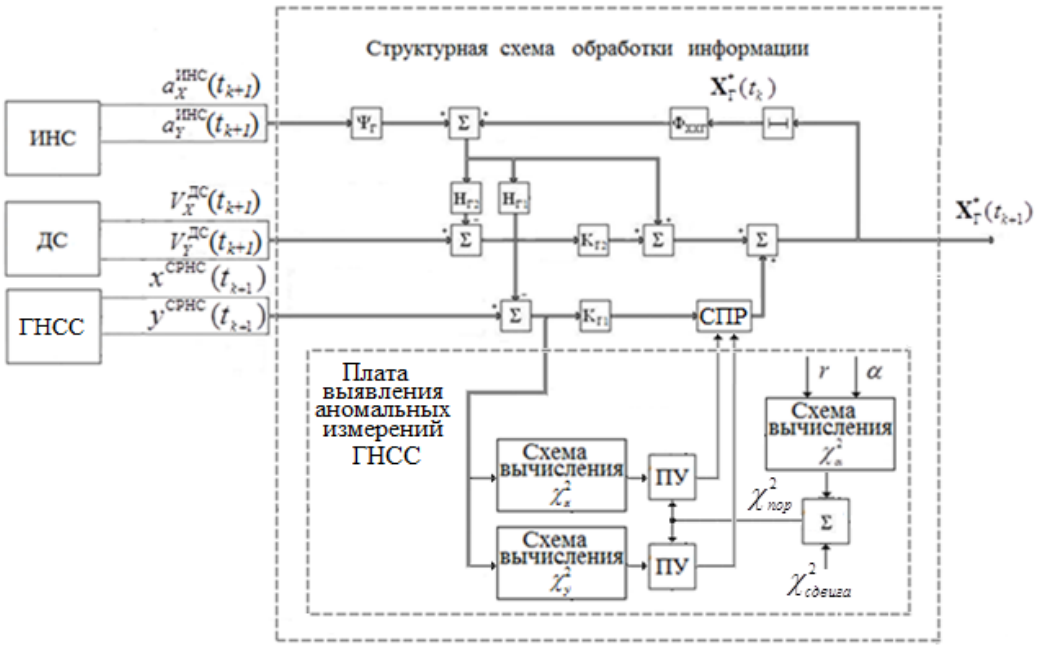


Рис. 2

Библиографический список

1. Кузовков, Н. Т. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н. Т. Кузовков, О. С. Салычев. – М. : Машиностроение, 1982.
2. Ярлыков, М. С. Марковская теория оценивания случайных процессов / М. С. Ярлыков, М. А. Миронов. – М. : Радио и связь, 1993. – 464 с.
3. Иванов, А. В. Информационно-измерительная система определения высоты летающего беспилотного транспортного средства с выявлением аномальных измерений сигналов спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов, С. Н. Данилов, А. А. Иванов, Н. А. Лежнева // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2026. – Т. 32, № 1. – С. 6 – 13.

4. Определение аномальных измерений псевдодальности до навигационного космического аппарата в аппаратуре приема сигналов спутниковой радионавигационной системы / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, А. А. Иванов, Н. А. Лежнева // Радиотехника и электроника – 2024. – № 8(69). – С. 727 – 740.

5. Адаптивные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах подвижных наземных объектов / А. В. Иванов, В. Ю. Шишкин, Д. В. Бойков и др. // Радиотехника и электроника – 2021. – № 8(66). – С. 1 – 12.

6. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 625 с.

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖСЕТЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА «СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА»

В. Д. Мартынюк, А. И. Сукачев, Д. В. Тимофеев

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
(e-mail: mag.dip@yandex.ru; mag.dip@yandex.ru; mag.dip@yandex.ru)

В настоящее время парадигма использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) внедряется во все сферы общественной жизнедеятельности все больше и больше. В связи с чем возникает проблема защиты частных территорий от использования БПЛА потенциальными нарушителями. Следовательно, возникает потребность в создании системы, которая позволила бы противодействовать этому.

Первоочередным методом противодействия угрозы БПЛА является обнаружение. Для решения этой задачи командой авторов [1] разработан программно-аппаратный комплекс «Система мониторинга воздушного пространства», который состоит из набора различных программных и аппаратных компонент. К аппаратным компонентам можно отнести акустические и оптические сенсоры, а также комбинированные решения. К программным относятся: клиентское программное обеспечение для операторов и серверное программное обеспечение с набором различных модулей. Особенностью системы является комплексный подход обнаружения с помощью различных методов, а также сетевое взаимодействие компонентов.

Сетевое взаимодействие компонентов организовано через центральный узел, называемый сервером. К нему подключаются все оставшиеся компоненты, каждый из которых имеет свой уникальный «валидационный ключ». Он необходим для авторизации компоненты внутрисерверного программного обеспечения.

Данный ключ уникален для каждого устройства и вшивается внутрь на этапе наладки аппаратуры при производстве отдельных единиц. После успешной валидации аппаратные блоки начинают трансляцию своих данных на сервер, которые можно просмотреть на рабочем месте оператора посредством запроса на подключение к потоковой передаче данных устройства.

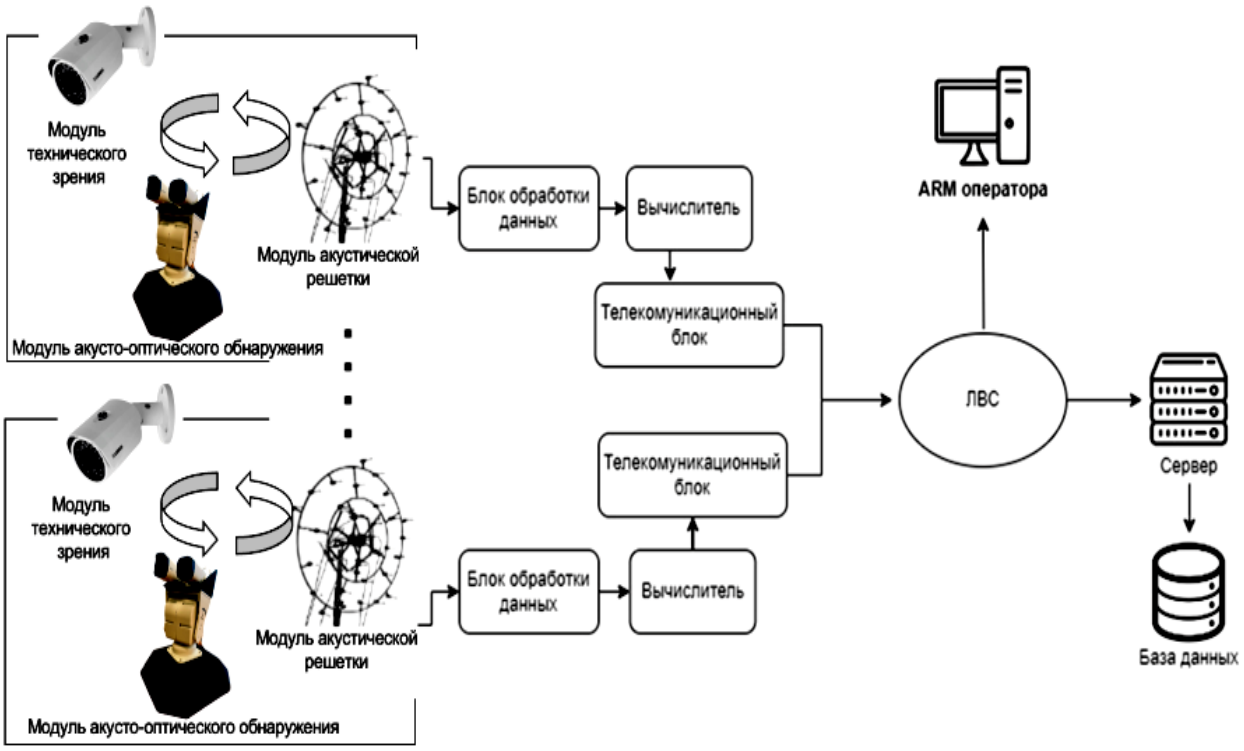


Рис. 1. Структурная схема системы

Помимо этого, внутри сервера развернуты несколько нейросетевых моделей, для проверки факта наличия БПЛА. В случае обнаружения на рабочее место оператора отправляется уведомление о том, что аппаратное устройство обнаружило дрон. Также стоит отметить, что все сетевые компоненты между собой общаются по разработанному шифрованному протоколу, работающему по принципу «заголовка + тело сообщения», где заголовок содержит информацию о типе сообщения, будь оно служебное или стрим данных, а также размер, который необходимо будет считать на серверном или клиентском программном обеспечении.

Библиографический список

1. Программно-аппаратный комплекс обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов / В. Д. Мартынюк, Д. А. Рыбников, А. И. Сукачев, Е. А. Сукачева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 97 – 102.

МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ БПЛА И ЕГО ТТХ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

И. П. Медведев, Т. У. Умиров

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: tambov685@yandex.ru; timuru423@bk.ru)

В рамках активного распространения беспилотных летательных аппаратов как в гражданской, так и военной сфере, достаточно важным фактором является техническое обеспечение по эффективному и своевременному обнаружению БПЛА и возможности их классификации в режиме реального времени.

В данной статье рассмотрим возможность использования радиологических изображений для определения ТТХ БПЛА в режиме реального времени при помощи использования технологий искусственного интеллекта. Однако важно заранее рассмотреть основные признаки по классификации БПЛА, а именно: масса и габариты летательного аппарата, его дальность полета, высота применения, тип аэродинамической схемы, назначение (в частности: разведка, транспортировка грузов), тип двигателя, режим управления, скорость полета, маневренность, тип полезной нагрузки, а также сценарии, связанные непосредственно с применением данного типа БПЛА, что в частности позволит обеспечить скорость и эффективность комплексов противодействия [1].

Базово рассмотрим метод классификации БПЛА на основе полученного радиологического изображения, представленного на рис. 1.

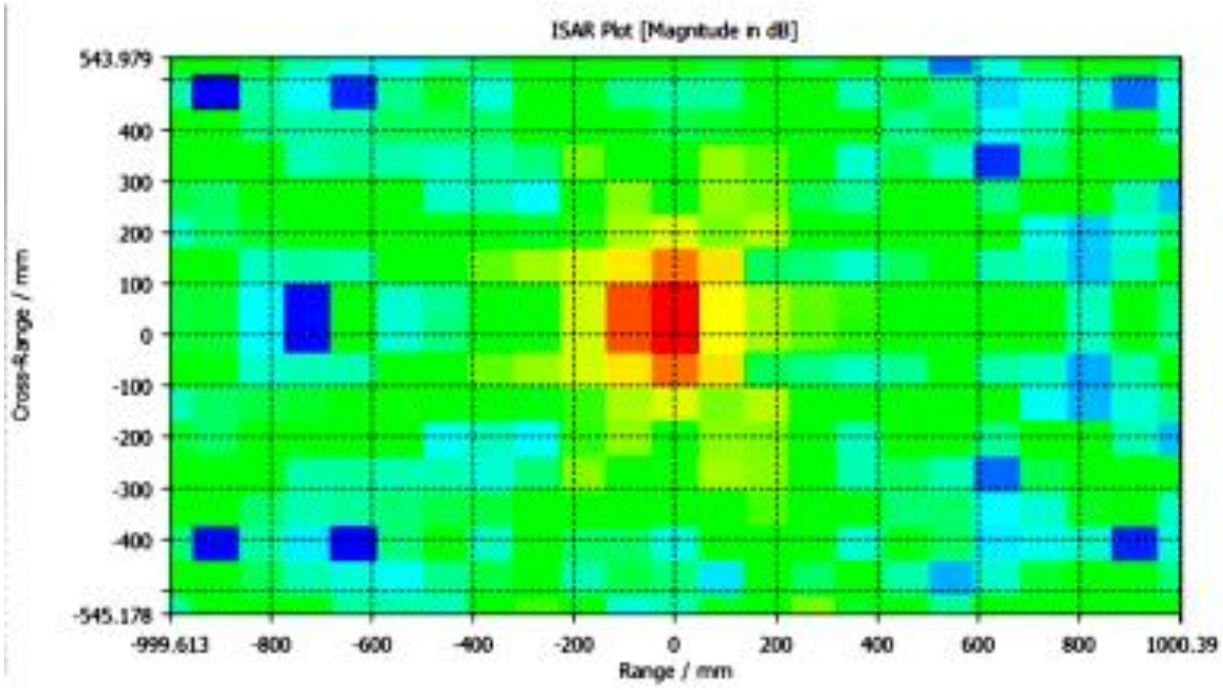


Рис. 1. Радиологическое изображение потенциального БПЛА

Для определения ТТХ летательного аппарата используется не только радиологическое изображение БПЛА, но и алгоритмы, основанные на технологиях искусственного интеллекта. Подобная кооперация позволяет в реальном времени сравнивать полученные изображения с обширной базой данных, обеспечивая распознавание модели при ее наличии в базе или подбор наиболее близкого варианта по исходным параметрам:

1. Геометрические признаки: форма сигнатуры, распределение интенсивности, контурные характеристики.
2. Спектральные признаки: частотные компоненты, микродоплеровские спектры, энергетические распределения.
3. Статистические признаки: моменты распределения, текстурные характеристики, энтропия.

На выходе для оператора комплекса противодействия предоставляются данные по: конструкции БПЛА, потенциальной грузоподъемности, режиме управления, а также выборке сценариев поведения похожих БПЛА, что в свою очередь позволит своевременно обеспечить наиболее подходящий выбор противодействия летательному аппарату в рамках его несанкционированного доступа на объект [2].

В заключение важно отметить, что классификация БПЛА на основе радиологических изображений с использованием ИИ позволит значительно повысить эффектность комплексов обнаружения и противодействия. Однако в рамках этого необходимы достаточные вычислительные показатели системы, а также широкая выборка иных радиологических изображений.

Библиографический список

1. Применение многослойных сверхточных нейронных сетей при идентификации объектов на радиологических изображениях комплекса обнаружения малых БАС / А. О. Смирнов, О. А. Белоусов, А. А. Тришаков, М. М. Кирюпин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2023. – С. 199 – 202.

2. Анализ функционирования систем автоматического обнаружения на основе анализа характера помех от беспилотных летательных аппаратов / М. М. Кирюпин, О. А. Белоусов, В. В. Носков, А. А. Мамедов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. Восьмой Всерос. молодежной научной конференции. – 2023. – С. 184–185.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

ПРИМЕНЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕТЕЙ Wi-Fi ДЛЯ НАВИГАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

А. В. Мордовин, С. П. Москвитин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: al.mordovin2016@yandex.ru)

В настоящее время задача определения координат местоположения объектов является актуальной для широкого круга задач навигации и мониторинга. Наиболее распространенным решением являются глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS), такие как GPS и ГЛОНАСС. Данные системы обеспечивают высокую точность позиционирования, однако требуют прямой видимости спутников, что ограничивает их применение в условиях плотной городской застройки и внутри помещений [1].

Для навигации внутри помещений применяются различные методы, включая системы на основе Bluetooth Low Energy, ультраширокополосные системы, радиочастотную идентификацию, а также инерциальные навигационные системы. Методы на основе Bluetooth и RFID требуют установки дополнительной инфраструктуры. Ультраширокополосные системы обеспечивают высокую точность, однако характеризуются высокой стоимостью. Инерциальные системы подвержены накоплению ошибки во времени [2, 3].

Одним из таких подходов является определение координат объекта по уровню принимаемого сигнала RSSI точек доступа Wi-Fi. Каждая точка доступа идентифицируется по SSID- и MAC-адресу.

Расстояние до точки доступа определяется по выражению

$$D = 10^{\left(\frac{P_{RSSI_0} - P_{RSSI}}{10n}\right)}, \quad (1)$$

где D – расстояние до точки доступа, м; P_{RSSI_0} – уровень сигнала на расстоянии 1 м, дБм; P_{RSSI} – измеренный уровень сигнала, дБм; n – показатель затухания сигнала.

Определение координат осуществляется методом трилатерации. Схема расположения точек доступа и объекта представлена на рис. 1.

Средняя погрешность метода составляет 2…4 м. Для повышения точности применяются усреднение и фильтрация, например, фильтр Калмана [3].

Преимуществом метода является отсутствие необходимости дополнительной инфраструктуры и низкая стоимость реализации. Метод может применяться на стандартных мобильных устройствах.

Получить еще большую точность позиционирования может помочь информация о состоянии канала (CSI). В отличие от RSSI, она содержит данные об амплитуде и фазе сигнала, что позволяет учитывать многолучевое распространение и повышать точность определения координат.

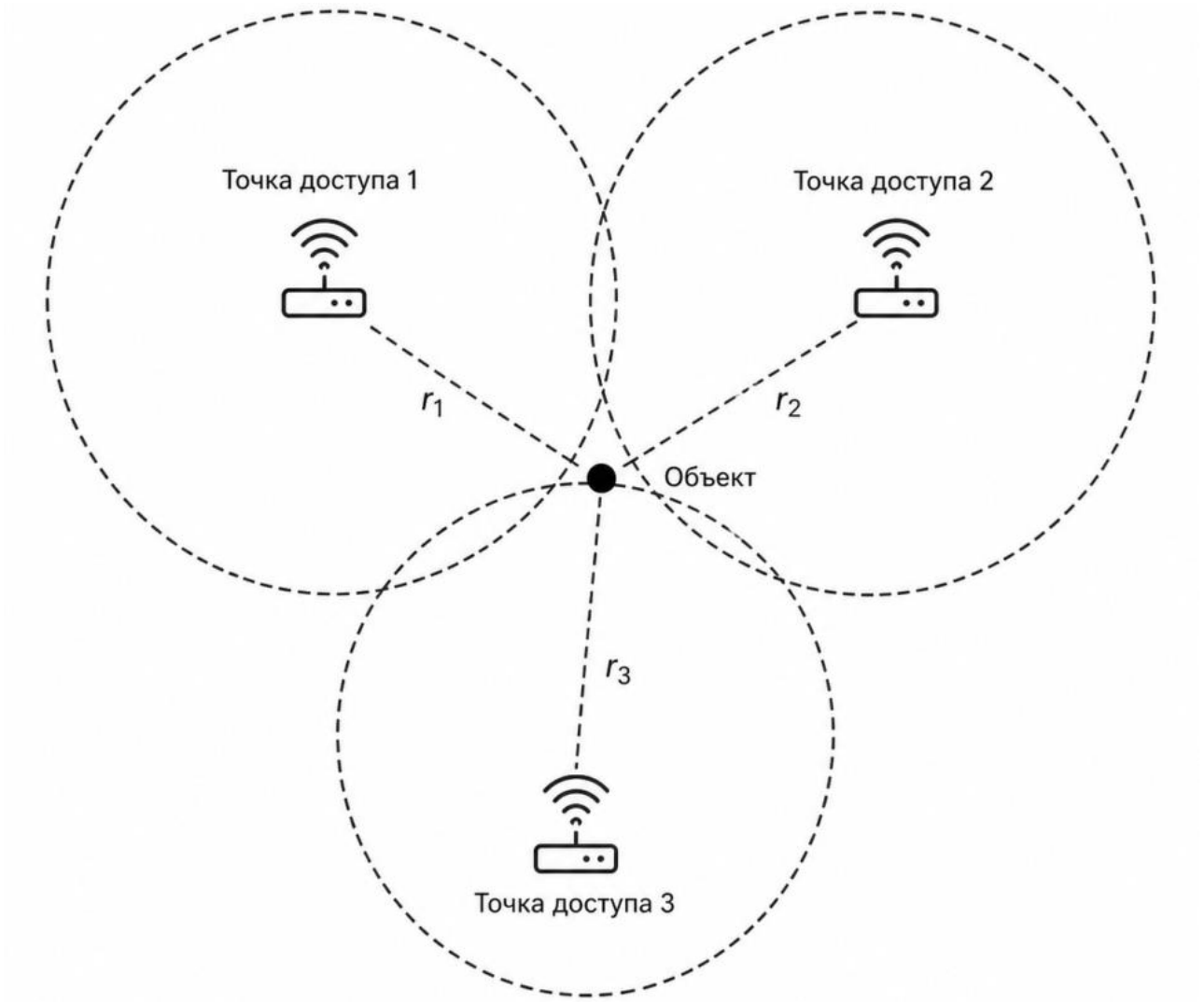


Рис. 1. Схема расположения точек доступа Wi-Fi и объекта позиционирования

Библиографический список

1. Экспериментальное исследование появления аномальных измерений спутниковых навигационных систем / А. В. Мордовин, А. А. Иванов, Н. А. Лежнева, С. П. Москвитин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 125 – 127.

2. Кокорева, Е. В. Исследование распространения радиоволн внутри помещений с целью определения местоположения движущихся объектов / Е. В. Кокорева, А. С. Брагин, К. И. Шурыгина // Вестник СибГУТИ. – 2025. – Т. 19, № 1. – С. 80 – 94.

3. Иванов, А. В. Навигация наземных объектов / А. В. Иванов, Н. А. Иванова. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 120 с.

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ МАЛОРАЗМЕРНЫХ МАНЕВРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

В. В. Попов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: vadim.popov.2002@bk.ru)

Современные системы слежения все чаще сталкиваются с задачами определения местоположения малых и быстроперемещающихся объектов, таких как дроны, беспилотные летательные аппараты, небольшие морские суда или даже микророботы. Маневрирующие объекты могут менять свою траекторию в короткие сроки, что требует разработки алгоритмов, способных быстро и точно определять их координаты в условиях ограниченности данных и помех. Маневрирующие объекты могут менять свою траекторию в короткие сроки, что требует разработки алгоритмов, способных быстро и точно определять их координаты в условиях ограниченности данных и помех (рис. 1).



Рис. 1. Малоразмерные маневрирующие объекты

Современные системы объединяют данные с различных датчиков, что требует эффективных алгоритмов их объединения и оценки положения объектов с минимальными погрешностями. Надежное отслеживание движущихся небольших объектов важно для предотвращения столкновений, обеспечения безопасности воздушного и морского пространства, а также для мониторинга окружающей среды. Исследования в этой области позволяют усовершенствовать существующие методы, снизить вычислительные затраты и повысить устойчивость систем к помехам и ошибкам, что важно для гражданских, военных и промышленных приложений

В сферах, связанных с разработкой информационно-измерительных систем (ИИС) для наведения и локации, важной задачей является определение параметров и координация движения дистанционно управляемых средств. Аналогичные задачи решаются с помощью радиолокационных систем (РЛС). Одной из ключевых частей системы контроля воздушных объектов являются параметры движения беспилотных летательных аппаратов, интегрированные с радиолокацией для определения их положения в каждый момент времени (рис. 2).

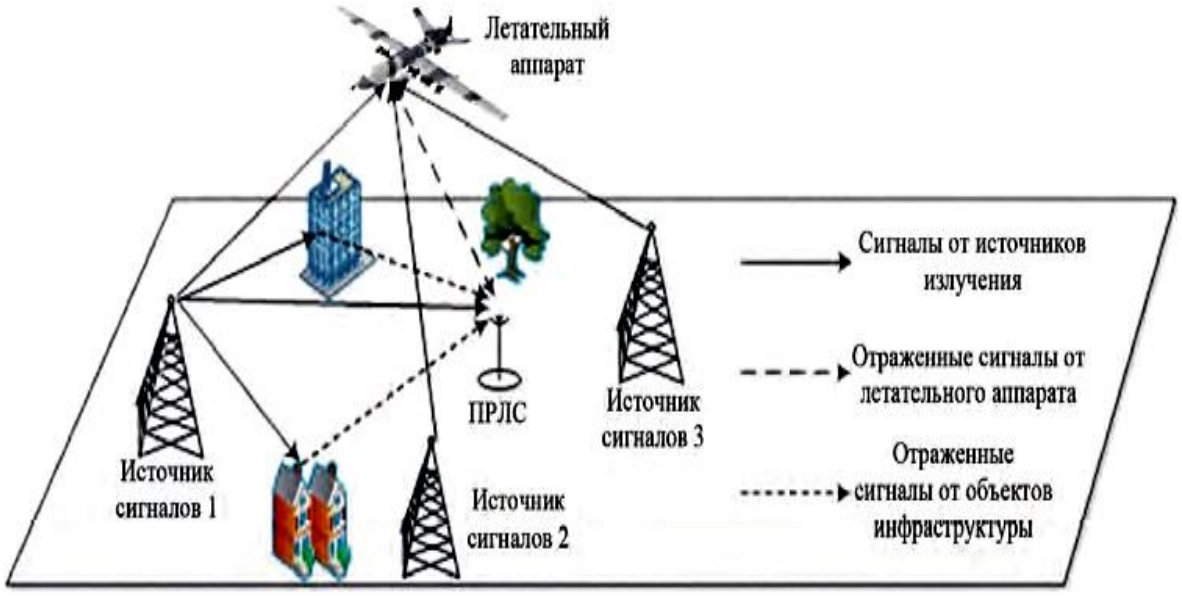


Рис. 2. Определение параметров БПЛА с помощью РЛС

В настоящее время ведутся интенсивные исследования и разработки в области обработки радиолокационной информации, обусловленные техническими и теоретическими изменениями в структуре РЛС. Радиолокационные системы играют важную роль в обнаружении и отслеживании воздушных целей, особенно при резких маневрах, что особенно важно для беспилотных средств с высокой грузоподъемностью.

Также важна разработка систем слежения за беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), поскольку современные БПЛА по характеристикам приближаются к пилотируемым, представляя потенциальную опасность для пассажирских и транспортных судов, особенно вблизи аэродромов, а также могут использоваться в противоправных целях. Поэтому создание методов и средств слежения за беспилотниками – актуальная задача современной науки и техники.

Библиографический список

1. Пудовкин, А. П. Современные системы радиосвязи [Электронный ресурс, мультимедиа] : учебное пособие : в 2-х кн. / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – Кн. 1. – URL: http://www.tstu.ru/r.php?r=obuch.book.elib3&id=12&year=2015 (дата обращения: 20.04.2026).

2. Сухарев, Н. В. Система слежения за автомобильным транспортом на базе беспилотных летательных аппаратов с применением технологии радиочастотной идентификации и камер инфракрасного диапазона / Н. В. Сухарев. – М. : Изд-во Российский университет транспорта (МИИТ), 2023. – № 2. – С. 142 – 145.

3. Дронова, О. Б. Современные возможности применения беспилотных летательных средств для обеспечения контроля безопасности дорожного движения / О. Б. Дронова. – Волгоград : Волгоградская академия МВД России, 2023. – № 1. – С. 94.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДИФИКАЦИИ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

У. С. Рустамов, С. Х. Уткирова

Ферганский государственный технический университет, Узбекистан
(e-mail: rustamov-83@inbox.ru; otkirovasevaraxon@gmail.com)

Современная система здравоохранения опирается на высокоточное, надежное и безопасное медицинское оборудование. Быстрое развитие медицинских технологий создает потребность в постоянном обновлении, усовершенствовании и модификации существующего медицинского оборудования. Процесс модификации служит для расширения функциональных возможностей медицинского оборудования, устранения технических недостатков и адаптации его к требованиям клинической практики [1, 2].

Сегодня вместо полной замены дорогостоящих импортных медицинских изделий, их модификация является экономически эффективным решением. Особенно в условиях Узбекистана адаптация существующих медицинских изделий к местным условиям и продление срока их службы являются неотложной задачей. Поэтому важно изучать методы модификации медицинских изделий на научной основе.

С экономической точки зрения, модификация также имеет большое значение. По сравнению с приобретением нового медицинского оборудования, модернизация существующих устройств требует меньших затрат. Особенно в развивающихся странах модификация является важным решением для поддержания и улучшения материально-технической базы медицинских учреждений. Модификации, вносимые в электрокардиографы, аппараты УЗИ, мониторинговые и лабораторные приборы, напрямую способствуют повышению качества диагностики и безопасности пациентов в системе здравоохранения.

Методы модификации медицинского оборудования представляют собой комплекс мер, направленных на расширение его функциональных возможностей, повышение технической надежности и адаптацию к уровню современных клинико-технологических требований. К ним относятся [3]:

Техническая модификация осуществляется путем непосредственного воздействия на аппаратную часть медицинского прибора. Этот метод включает в себя обновление датчиков, преобразователей, усилителей, аналого-цифровых преобразователей и блоков питания.

Модификация программного обеспечения осуществляется путем обновления алгоритмов управления и анализа медицинского оборудования. В этом методе важно внедрение алгоритмов цифровой обработки сигналов, автоматического анализа данных, искусственного интеллекта и машинного обучения.

Структурная модификация направлена на улучшение внешнего вида, механической конструкции и эргономики медицинского оборудования. Этот метод осуществляется за счет снижения веса устройства, создания мобильных и портативных вариантов, а также удобного размещения элементов управления.

Функциональная модификация направлена на расширение возможностей медицинского оборудования, позволяя объединить несколько диагностических или терапевтических функций в одном устройстве.

Цифровая трансформация предполагает интеграцию медицинского оборудования с информационными системами и сетями. Технологии Интернета вещей (IoT) позволяют подключать устройства к централизованным системам мониторинга, а данные могут передаваться и храниться удаленно. Этот метод важен для развития телемедицинских услуг, позволяющих осуществлять дистанционный мониторинг пациентов.

Модификация, ориентированная на безопасность, – это метод, направленный на приведение медицинских изделий в соответствие с международными стандартами безопасности. Усиление требований к электробезопасности, электромагнитной совместимости и биологической безопасности позволяет снизить уровень риска для пациентов и медицинского персонала. Модификация, ориентированная на безопасность, обеспечивает долгосрочное и надежное использование медицинских изделий. В современной медицине точность диагностики, повышение качества лечения и обеспечение эффективности медицинских услуг напрямую связаны с процессами модификации.

Кроме того, посредством модификаций устройства адаптируются к требованиям безопасности. Модификации, соответствующие стандартам электробезопасности, электромагнитной совместимости и биологической безопасности, снижают потенциальные риски для пациентов и медицинского персонала. Это важный показатель качества медицинской помощи.

Модификация медицинского оборудования также имеет значительные экономические преимущества, в то время как приобретение нового медицинского оборудования требует значительных капиталовложений, модификация существующего оборудования может продлить срок его службы и повысить окупаемость инвестиций.

Библиографический список

1. Фролов, С. В. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

2. Фролов, С. В. Системы поддержки принятия решений для задач оснащения лечебных учреждений медицинской техникой / С. В. Фролов, М. С. Фролова, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. Специальный выпуск (52). – 2014. – С. 105 – 110.

3. Интеграция медицинской техники в информационную систему лечебно-профилактического учреждения / С. В. Фролов, М. С. Фролова, И. А. Толстухин, В. Ю. Ошурков // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – № 3(53). С. 68 – 80.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В БОРЬБЕ С АКУСТИЧЕСКИМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

И. Е. Стародубцев, М. А. Беляев

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
(e-mail: master_ferrari@mail.ru)

Во всем мире акустическое (шумовое) загрязнение рассматривается сегодня как одна из серьезнейших проблем общественного здравоохранения и ведущий экологический фактор риска для здоровья населения. Согласно данным Всемирной организации здоровья (ВОЗ), длительное воздействие шума ассоциируется с широким спектром негативных последствий: сердечно-сосудистыми и метаболическими нарушениями, когнитивными расстройствами у детей, нарушениями сна, снижением качества жизни, а также психологическим дискомфортом [1]. Актуальность проблемы усиливается тем, что шум в условиях урбанизированной среды превращается в постоянный повреждающий фактор, воздействующий на организм человека не только через слуховой анализатор (тугоухость, шум в ушах), но и через экстраауральные пути, вызывая вегетативные реакции, стресс и повышение артериального давления.

В глобальном смысле масштабы шумового загрязнения достигли уровня, сопоставимого с загрязнением воздуха. По данным ВОЗ, уровни шума выше рекомендованных нормативов (среднесуточный $L_{\text{день}}$ более 53…54 дБ для автомобильного и железнодорожного транспорта и более 45 дБ для авиационного) фиксируются в большинстве крупных городов мира. Особую озабоченность вызывает ночной шум: даже при уровнях $L_{\text{ночь}t}$ выше 40 дБ (для авиации) и 45 дБ (для автотранспорта) регистрируются достоверные нарушения структуры сна, что в долгосрочной перспективе повышает риск сердечно-сосудистой смертности.

Исследователи отмечают, что акустическое загрязнение окружающей среды следует рассматривать как одну из глобальных проблем современной экологии. В данном контексте правомерно говорить о формировании «шумовой болезни» – системного патологического состояния, при котором наряду с поражением слухового анализатора закономерно страдает и нервная система, что свидетельствует о генерализованном влиянии шума на весь организм [2].

Российские города в целом отвечают всем признакам урбанизированных территорий с повышенной шумовой нагрузкой. Основной вклад в акустическое загрязнение вносит автомобильный транспорт. Внимания заслуживает и тот факт, что масштабное строительство новых жилых домов в условиях сложных рельефов также приводит к дополнительному росту шумовой нагрузки.

В настоящее время инженеры располагают эффективными средствами борьбы с избыточным звуковым давлением. Традиционно для ограждения жилой застройки от транспортного, строительного и промышленного шума применяются шумовые экраны, которые делятся на шумопоглощающие (непрозрачные) и шумоотражающие (светопрозрачные). Комбинированные экраны,

устанавливаемые вдоль автодорог, дополнительно снижают утомляемость водителей [3].

Современные технологии совершают переход от «глушения» шума тяжелыми материалами к интеллектуальному «рассеиванию» его с помощью метаматериалов и его структуры. Рассмотрим некоторые инновационные технологии подавления шума.

Так, например, специалисты Института теплофизики СО РАН создают устройства на базе графена, которые могут использоваться как источники звука, системы шумоподавления и нагревательные элементы [4]. Графен эффективнее металлических пленок благодаря минимальной толщине и низкой теплоемкости. Он быстрее отдает тепло, повышая преобразование энергии в звук и позволяя работать на сверхвысоких частотах. Разработанные методы получения и обработки графеновых пленок делают возможным создание готовых устройств. Их можно применять в «звучащих» окнах и дисплеях, системах шумоподавления и антиобледенительных покрытиях.

В свою очередь, исследователи из китайского университета Тяньгун, вдохновившись бесшумным полетом сов, разработали двухслойный звукоизоляционный материал [5]. Это аэрогель – сверхлегкое пористое вещество, которое поглощает до 58% звуковых волн и снижает шум от автомобилей и промышленного оборудования. Его нижний слой с сотовой структурой, похожей на кожу совы, подавляет низкие частоты. Верхний слой из кремниевых нановолокон, имитирующий мягкие перья, поглощает высокочастотные звуки. В отличие от традиционных решений, этот легкий материал эффективно снижает разные типы шума в широком диапазоне частот. Испытания показали, что материал способен снизить уровень шума автомобильного двигателя с 87,5 до 78,6 дБ, что превышает показатели многих существующих аналогов.

Таким образом, в последние годы в области борьбы с шумом произошел переход от пассивной звукоизоляции (поглощение и отражение волн) к применению акустических метаматериалов и активных системы шумоподавления.

Научный руководитель канд. техн. наук, доцент ДЭТиП Ю. В. Миргородская.

Библиографический список

1. Руководство по вопросам шума в окружающей среде для Европейского региона: резюме [Электронный ресурс] // ВОЗ : сайт. 2018. – URL: https://www.who.int/europe/ru/publications/i/item/WHO-EURO-2018-3287-43046-60243 (дата обращения: 04.05.2026).

2. Васильев, А. В. Шум как фактор экологического риска в условиях урбанизированных территорий / А. В. Васильев // Noise Theory and Practice. – 2015. – Т. 1, № 2(2). – С. 27 – 40.

3. Цуканова, О. С. Проблема борьбы с шумом. История и основные направления развития методов снижения уровня шума / О. С. Цуканова, Н. А. Петрикеева // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2009. – № 1(1). – С. 67 – 74.

4. Сибирские ученые разработали графеновые излучатели звука и тепла [Электронный ресурс] // Сибирская наука : сайт. – 2025. – URL : https://sib-science.ru/news/sibirskie_uchenie_razrabotali_grafenovie_izluchateli_zvuka_i_tepla_18_11_2025 (дата обращения: 04.05.2026).

5. Новый аэрогель снизил шум автомобильного двигателя на 58% [Электронный ресурс] // Overclockers.ru : сайт. – 2026. – URL : https://overclockers.ru/blog/apprenticebase/show/230484/Novyj-aerogel-snizil-shum-avtomobilnogo-dvigatelya-na-58 (дата обращения: 04.05.2026).

МЕТОДОЛОГИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ: КРИТЕРИИ ОТКАЗА И ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ

И. В. Хорохорин, А. П. Пудовкин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: il130964@mail.ru; resbn@mail.ru)

Цель ускоренных испытаний – достичь отказа или накопления повреждений за время, намного меньшее реального срока эксплуатации [5]. Для этого применяют три способа: повышение интенсивности параметров, влияющих на долговечность; увеличение частоты воздействия при сохранении расчетного уровня параметров; комбинированный подход. Ключевое условие корректности – установление коэффициента ускорения, связывающего режим испытаний с реальными условиями. Без этого выводы могут быть ошибочными, однако избежать ускоренных испытаний нельзя: срок активного существования современной электроники слишком велик для реалистичных экспериментов [3].

Для паяных соединений наиболее значимы испытания на тепловую усталость, термоудар и вибрацию [2]. Выбор типа и режима определяется по аналогам и условиям эксплуатации [1]. При термоциклировании платы поочередно подвергают воздействию высоких и низких температур с выдержкой на каждом пределе (например, –40…+125 °C). Спектр реальных вибраций широкополосный, и его успешно моделируют с помощью случайной (непериодической) вибрации, часто в комбинации с синусоидальной [1].

При механических испытаниях необходима поправка на импеданс установки – это повышает достоверность приближения к реальности. Испытания на механический удар имитируют экстремальные нагрузки (мгновенное приложение нагрузки, резкое изменение движения, например при старте ракеты-носителя) [3]. На временную диаграмму удара влияет масса образца, особенно, когда она сравнима с массой установки. Вид диаграммы выбирают исходя из ожидаемого реального воздействия.

Самая сложная задача – зафиксировать момент усталостного разрушения паяного соединения. Сравнение результатов разных серий затруднено из-за несопоставимости критериев отказа [4]. Распространенные критерии: визуальный контроль трещин, падение прочности через заданные интервалы,

петли гистерезиса напряжение–деформация, рост электрического сопротивления, непрерывный мониторинг сопротивления для обнаружения кратковременных обрывов [6]. Критерии, требующие остановки испытаний, увеличивают время эксперимента и могут исказить результаты. Множество подходов и разница в методиках измерений серьезно усложняет сопоставление данных [1].

Для ускоренных испытаний предлагается следующий критерий отказа: первое прерывание электрической цепи, подтвержденное девятью дополнительными прерываниями в пределах дополнительных 10% от циклической долговечности [4]. Обнаружение отказа – непрерывный контроль последовательной топологии контуров. Условия: регистрируется не менее одного прерывания длительностью до 1 мкс в любом интервале опроса до 2 с; для подтверждения первого отказа – не менее 10 таких прерываний на каждый контур; контрольный ток – не более 2 мА при напряжении до 10 В, разрыв фиксируется при сопротивлении 1000 Ом и более [6].

Ускоренные испытания паяных соединений – необходимый, но рискованный инструмент. Главные риски: неверный выбор коэффициента ускорения и несопоставимость критериев отказа. Переход от периодического визуального контроля к непрерывному электрическому мониторингу с микросекундным разрешением снижает неопределенность и повышает воспроизводимость результатов. Параметры (ток ≤ 2 мА, порог 1000 Ом, 10 подтверждающих прерываний) рекомендуется включать в методики испытаний.

Библиографический список

1. Наседкин, А. В. Методика и средства испытаний паяных соединений поверхностно-монтируемых радиоэлектронных средств космических аппаратов в условиях комбинированной пайки: дис. … канд. техн. наук: 05.12.04 / А. В. Наседкин. – М., 2014. – 186 с.

2. ГОСТ 28228–89 (МЭК 68-2-44-79). Основные методы испытаний на внешние воздействия. Испытание Т. Пайка. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 12 с.

3. ГОСТ Р 70911–2023. Системы автоматизированного проектирования электроники. Подсистема виртуальных испытаний электронной аппаратуры на воздействие одиночного механического удара. – М. : Российский институт стандартизации, 2023. – 20 с.

4. Лозовой, И. А. Статистическая обработка результатов испытаний паяных соединений компонентов радиоэлектронных модулей / И. А. Лозовой, А. В. Турецкий // Радиотехника. – 2013. – № 3. – С. 82 – 84.

5. РД 50-424–83. Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения. – М. : Издательство стандартов, 1984. – 32 с.

6. ГОСТ 26446–85. Соединения паяные. Методы испытаний на усталость. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 25 с.

«УМНАЯ» ТЕЛЕЖКА ДЛЯ ОФИСА

И. А. Чупахин, Н. М. Гребенникова

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: ivanchupa1709@yandex.ru)

В современных офисах, где эффективность и скорость работы имеют ключевое значение, автоматизация рутинных процессов становится не просто полезным дополнением, а важной составляющей успешного бизнеса. Именно таким решением является «умная тележка» – инновационный помощник, способный самостоятельно перевозить документы, канцтовары и другие небольшие грузы между отделами, освобождая сотрудников от рутинных задач и позволяя им сосредоточиться на более важных делах.

Основу конструкции тележки составляют четыре прочные платформы, которые служат надежным основанием для всех остальных элементов [1]. Для плавного и устойчивого передвижения используются четыре колеса диаметром 80 мм, приводимые в движение двумя мощными мотор-редукторами. Управление всей системой осуществляется через контроллер Arduino UNO R3, работающий в паре с платой расширения Motor Shield 298P – это сочетание обеспечивает точное управление движением, включая регулировку скорости и направления.

Важной частью тележки является ее энергосистема, включающая блок аккумуляторов с проводами, индикатор заряда 2S и блок питания 9В для подзарядки. Благодаря этому устройство может работать автономно в течение длительного времени. Особенностью тележки является Bluetooth-модуль HC-06, позволяющий управлять ею дистанционно с помощью смартфона или планшета. Это делает использование тележки максимально удобным и интуитивно понятным [2]. Дополнительные возможности открывает сервопривод MG996R, который можно запрограммировать для выполнения различных механических действий, например, подъема или опускания груза.

Тележка оснащена всеми необходимыми компонентами для удобного наблюдения за ее работой: светодиодами для индикации состояния, выключателем KCD1-11 для быстрого включения и выключения, боковыми частями с разъемом питания, а также креплениями для мотор-редукторов и полным набором крепежных элементов [3]. Это делает сборку и эксплуатацию устройства простой и доступной даже для тех, кто не имеет большого опыта в робототехнике.

Собранная тележка найдет широкое применение в различных офисных сценариях. Она идеально подходит для доставки документов между отделами, транспортировки образцов продукции во время презентаций или перевозки небольших грузов в пределах офиса. При необходимости конструкцию можно легко модернизировать, добавив датчики препятствий для автоматического объезда объектов или голосовое управление для еще большего удобства.

Библиографический список

1. Дубинина, В. В. Анализ тенденций развития логистических роботов / В. В. Дубинина // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов-МКО-2022. – 2022. – С. 114 – 122.

2. Конструирование приложения для молодых матерей / Т. А. Фролова, Е. П. Евстигнеева, Е. В. Сеченева, Н. Р. Моргунов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – С. 349 – 351.

3. Оптимизация складских операций с помощью интеллектуальных мини-роботов / Н. М. Гребенникова, И. А. Чупахин, М. А. Любавина, Т. А. Чупахина // Исследования и практика в социально-экономической и гуманитарной сфере : сб. ст. XLIII Всерос. (национальной) науч. конф., Санкт-Петербург, 09 июля 2025 года. – СПб. : Гуманитарный национальный исследовательский институт НАЦРАЗВИТИЕ, 2025. – С. 51 – 53.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ПОДГОТОВКЕ ПИЛОТОВ БПЛА

И. А. Чупахин, М. С. Демидов, Н. М. Гребенникова

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(e-mail: ivanchupa1709@yandex.ru)

Основным препятствием при подготовке операторов дронов является высокая угроза поломки оборудования и опасность для окружающих, так как каждое практическое занятие может закончиться падением аппарата. Коренным образом изменить ситуацию способен специализированный учебный стенд. Он позволяет совершенствовать навыки управления в безаварийной и изолированной среде, где все риски сведены к нулю.

Конструктивно установка представляет собой прочную раму, к которой через систему динамических подвесов привязан реальный дрон. Для наглядности траектории применяется система подвижных колец, механически связанная с полетным контроллером: кольца в реальном времени повторяют все вращения дрона [1]. Сам дрон физически не может улететь, но вся его электроника работает как при реальном полете. Управление осуществляется штатным пультом, и беспилотник реагирует на команды идентично свободному полету. Это созда-

ет полный эффект присутствия при абсолютной безаварийности, ускоряя выработку мышечной памяти.

Система фиксации, над которой идет работа, позволяет перенастраивать стенд под разные модели коптеров. Для подбора оптимальной геометрии спроектированы и изготовлены два пробных образца: регулируемая опора и массивный упорный фиксатор.

Проверка работоспособности проводилась на реальном дроне Mobula 8. Эксперименты подтвердили принципиальную возможность отработки навыков в замкнутой среде, но выявили недостатки. Критическими проблемами стали чрезмерная гибкость тонких валов и люфт между кольцами [2]. Кроме того, напечатанные крепления не обеспечивают жесткой установки дрона, а сам стенд не фиксируется к столу и смещается при интенсивных тренировках.

Испытания позволили сформулировать требования к доработке: усиление валов, устранение люфта, проектирование нового фиксатора и добавление монтажных отверстий.

Для устранения проблемы тонких валов предусмотрены несколько решений: введение ребер жесткости, увеличение диаметра, замена материала PLA на более прочный PETG, армирование стальным прутком, а также увеличение частоты опор.

Лишний ход между кольцами устраняется за счет посадки с микронатягом с учетом усадки материала при 3D-печати [3]. Дополнительно добавляются регулируемые прокладки; при необходимости интегрируется подшипник скольжения с нормированным зазором.

Непригодность креплений исправляется модульным фиксатором с универсальной платформой и быстросменными вставками-адаптерами под разные типы дронов. В станину интегрируются монтажные отверстия для жесткого крепления к столу. Все переработанные компоненты будут снова напечатаны и протестированы на Mobula 8.

Следующий этап – установка датчиков для анализа работы систем БПЛА в реальном времени. Данные будут выводиться на экран инструктора, что позволит обучать операторов выявлять неисправности и отрабатывать энергоэффективные режимы. Стенд можно оснастить вентилятором и гидроузлом для имитации погодных условий.

Разрабатываемый учебно-тренировочный комплекс полностью снимает проблему аварийности при начальной подготовке пилотов, позволяя отрабатывать маневры и действовать в нештатных ситуациях без риска повреждения оборудования.

Библиографический список

1. Минаев, Д. А. Моделирование вихревого эффекта / Д. А. Минаев, О. Н. Попов // Цифровая трансформация в энергетике : сб. тр. конф., Тамбов, 19 декабря 2024 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2025. – С. 67–68.

2. Вытовтов, А. В. Современные беспилотные летательные аппараты / А. В. Вытовтов, А. В. Калач, С. Ю. Разиньков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2015. – № 4. – С. 70 – 74.

3. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич. – 4 изд. – БХВ-Петербург, 2018.

Исследование выполнено за счет средств субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования, направленных на реализацию мероприятий по поддержке студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2026-199 от 20 апреля 2026 г.)

КАЛМАНОВСКИЙ ФИЛЬТР СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ

Н. В. Ширяева, Ю. Н. Панасюк

Тамбовский государственный технический университет Россия, Тамбов
(e-mail: natasha.0.06@mail.ru)

В данный момент вопрос о повышении пропускной способности с заданным уровнем безопасности воздушных судов стоит довольно остро. Частично решить эту проблему можно путем улучшения точностных характеристик информационно-измерительных и управляющих систем, что даст нам возможность повысить количество посадок самолетов, а следовательно, увеличить плотность воздушного движения.

Для этого рассмотрим методы алгоритмов с весовой обработкой. *Метод математического усреднения РЛИ* – его главным недостатком в рамках данного вопроса является усреднение, которое «размывает» границы между объектами, делая мелкие детали неразличимыми. Также метод подавляет не только шум, но и полезные высокочастотные компоненты изображения, содержащие информацию о текстуре поверхности [1]:

$$X_{\text{ТОИ}m}(k) = \frac{X_{1m}(k) + X_{2m}(k)}{2}. \quad (1)$$

Метод весовой обработки РЛИ – главным недостатком этого метода является использование априорных точностных характеристик РЛС [2, 3]:

$$X_{\text{ТОИ}m}(k) = b_1(k)X_1(k) + b_2(k)X_2(k); \quad (2)$$

$$X_{\text{ТОИ}m}(k) = \frac{\sigma_2^2 X_1(k) + \sigma_1^2 X_2(k)}{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}. \quad (3)$$

Метод оптимальной фильтрации в системах со случайной скачкообразной структурой использует апостериорные точностные характеристики РЛС,

что позволяет вычислять весовые коэффициенты, которые зависят от точностных характеристик фильтров РЛС [4]:

$$X^{j}_{k|k} = \sum_{i=1}^{M} W_k(\Theta_{k-1}=i)\, x^{ij}_{k|k} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sqrt{\frac{1}{2\pi V_k^{ij}}} \sum_{i=1}^{M} \exp\left\{-\frac{\nu_k^{(i)2}}{2\nu_k^{ij}}\right\} W_{k-1}(\Theta_{k-1}=i)\, x^{ij}_{k|k}}{\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{M} \sqrt{\frac{1}{2\pi V_k^{ij}}} \exp\left\{-\frac{\nu_k^{(i)2}}{2\nu_k^{ij}}\right\} W_{k-1}(\Theta_{k-1}=i)}. \quad (4)$$

В данной работе будем рассматривать маневр «Большая коробочка» (схема представлена на рис. 1).

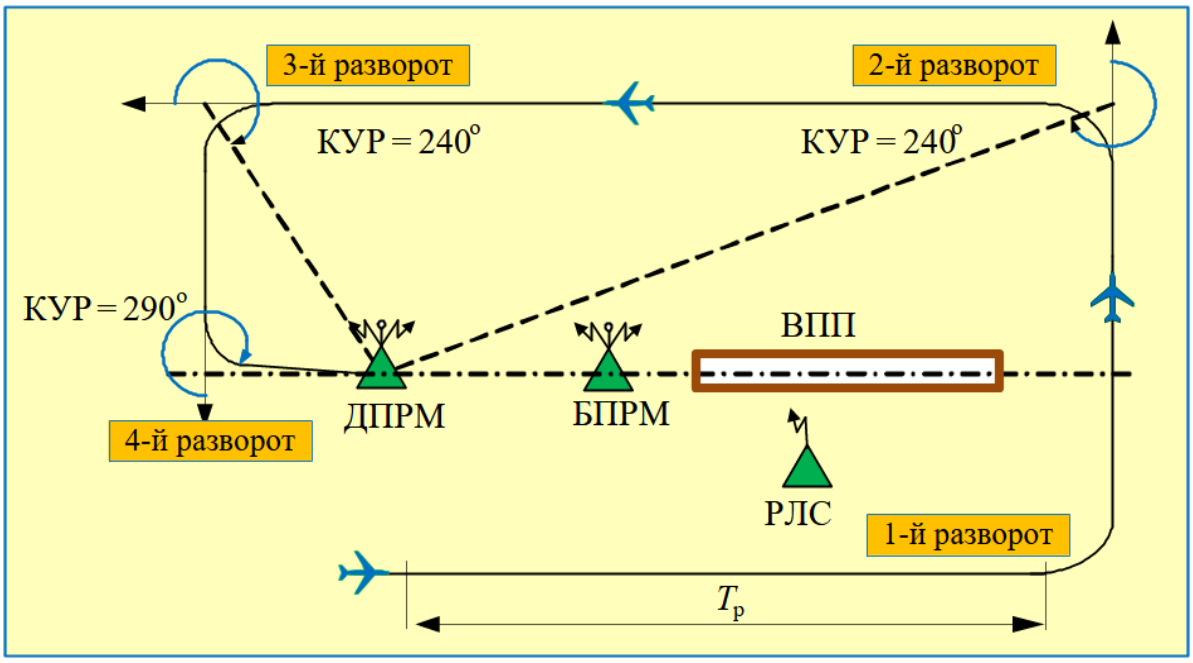


Рис. 1. Маневр «Большая коробочка»

Рассмотрим трехмерную модель состояния [5], двухмерную модель состояния [6] и одномерную модель наблюдения [7] угломерного канала в вертикальной плоскости для двух фильтров:

$$\left.\begin{aligned} \varphi_{в1}(k) &= \varphi_{в1}(k-1) + \omega_{в1}(k-1)\tau + 0{,}5\beta_{в1}(k-1)\tau^2; \\ \omega_{в1}(k) &= \omega_{в1}(k-1) + \beta_{в1}(k-1)\tau; \\ \beta_{в1}(k) &= (1-\alpha_ф\tau)\beta_{в1}(k-1)\tau + \xi_a(k-1); \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

$$\left.\begin{aligned} \omega_{в2}(k) &= (1-\alpha_ф\tau)\omega_{в2}(k-1) + \xi_v(k-1); \\ \varphi_{в1}(k) &= \omega\beta_{в1}(k) = (1-\alpha_ф\tau)\beta_{в1}(k-1) + \xi_a(k-1); \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

$$\omega_{ви}(k) = \omega_в(k) + \xi_и(k). \quad (7)$$

Предлагаемые модели позволят на основе положений теории систем со случайной структурой объединить оценки фазовых координат, полученные

при использовании двух моделей состояния, путем весового суммирования. Веса вычисляются исходя из анализа работы каждой из структур фильтра.

С учетом трех предыдущих выражений получаем модель системы со случайной структурой [8]

$$\varphi_{\text{в}}(k) = \sum_{m=1}^{2} W_m(k-1)\,\varphi_{\text{в}m}(k-1),\ m = 1,2, \tag{8}$$

где W_m – весовые коэффициенты трехмерной и двухмерной моделей.

Основное условие определения весовых коэффициентов при обработке радиолокационной информации заключается в том, чтобы их сумма была равна единице.

Учитывая предыдущие выражения [4 – 8], был получен алгоритм угломерного канала со случайной структурой [9 – 21]:

$$\varphi_{\text{ов1}}(k+1) = \varphi_{\text{эв1}}(k+1) + K_{\text{фв11}}\Delta\varphi(k+1); \tag{9}$$

$$\omega_{\text{ов1}}(k+1) = \omega_{\text{эв1}}(k+1) + K_{\text{фв12}}\Delta\varphi(k+1); \tag{10}$$

$$\beta_{\text{ов1}}(k+1) = \beta_{\text{эв1}}(k+1) + K_{\text{фв13}}\Delta\varphi(k+1); \tag{11}$$

$$\varphi_{\text{эв1}}(k+1) = \varphi_{\varphi_{\text{ов1}}}(k) + \omega_{\text{ов1}}(k)\tau + 0{,}5\beta_{\text{ов1}}(k)\tau^2; \tag{12}$$

$$\omega_{\text{эв1}}(k+1) = \omega_{\text{ов1}}(k) + \beta_{\text{ов1}}(k)\tau; \tag{13}$$

$$\beta_{\text{эв1}}(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}}\tau)\beta_{\text{ов1}}(k); \tag{14}$$

$$\Delta\varphi_{\text{в1}}(k+1) = \varphi_{\text{и}}(k+1) - \omega_{\text{эв1}}(k+1); \tag{15}$$

$$\varphi_{\text{ов2}}(k+1) = \varphi_{\text{эв2}}(k+1) + K_{\text{фв21}}\Delta\varphi(k+1); \tag{16}$$

$$\omega_{\text{ов2}}(k+1) = \omega_{\text{эв2}}(k+1) + K_{\text{фв22}}\Delta\varphi(k+1); \tag{17}$$

$$\varphi_{\text{эв2}}(k+1) = \varphi_{\varphi_{\text{ов1}}}(k) + \omega_{\text{ов1}}(k)\tau; \tag{18}$$

$$\omega_{\text{эв2}}(k+1) = (1-\alpha_{\text{ф}}\tau)\,\omega_{\text{ов2}}(k); \tag{19}$$

$$\Delta\varphi_{\text{в2}}(k+1) = \varphi_{\text{и}}(k+1) - \varphi_{\text{эв2}}(k+1); \tag{20}$$

$$\varphi_{\text{во}}(k+1) = W_1(k)\,\varphi_{\text{ов1}}(k) + W_2(k)\,\varphi_{\text{ов2}}(k),\ \ W_1(k) + W_2(k) = 1. \tag{21}$$

Проведено имитационное моделирование по алгоритму (9) – (21).

Результаты моделирования представлены на рис. 2, где показана зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) угла места от времени:

1. В угломерном канале по углу места использовалась двумерная модель состояния фильтра (фильтр 1).

2. В угломерном канале по углу места использовалась трехмерная модель фильтра состояния (фильтр 2).

3. В угломерном канале по углу места использовалась совместная обработка информации от фильтра 1 и фильтра 2.

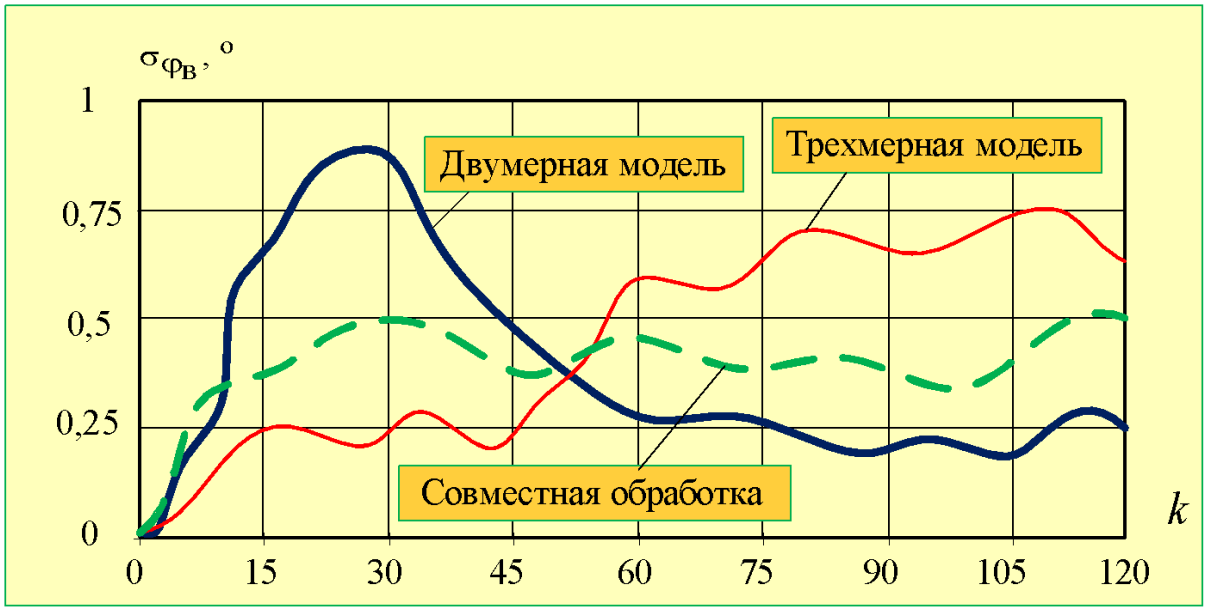


Рис. 2. Зависимости СКО угла места от времени

Таким образом, использование двух фильтров со случайной структурой угломерного канала в вертикальной плоскости позволяет повысить точность оценки угла места траекторной обработки информации от воздушных судов на всех этапах маневра «большая коробочка».

Библиографический список

1. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015, Is. 3, article id. 032111.

2. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учебное пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

3. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С 55 – 59.

4. Indication of relative motion intensity of aerodynamic object and meters with different physical nature / S. N. Danilov, S. P. Moskvitin, Yu. N. Panasyuk, et al. // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1901. – 2021.

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СБОРОЧНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

С. Э. Эктов, А. Н. Грибков, А. А. Терехова

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
(e-mail: s.e@ektov.ru)

Современное сборочное производство радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) характеризуется мелкосерийностью, широкой номенклатурой, частыми изменениями конструкций и жесткими требованиями к соблюдению сроков при высокой стохастичности производственной среды. Традиционные методы планирования, реализованные в ERP- и MES-системах, не позволяют в полной мере учитывать динамические возмущения (сбои оборудования, задержки поставок, изменение приоритетов заказов) и оперативно корректировать расписание. В работе предложен трехуровневый алгоритмический комплекс для системы оптимального управления сборочным производством РЭА, обеспечивающий иерархическое согласование решений на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях.

Для построения математической постановки задачи оптимального планирования и управления сборочным производством требуется задать целевую функцию, а также совокупность ограничений и условий. В рамках представленной модели в качестве критерия оптиманости выбрана минимизация общих затрат (1), обусловленных реализацией сформированного расписания выполнения производственной программы

$$Q_{\Sigma} = Q_{delay} + Q_{setup} + Q_{idle} + Q_{boost} \to \min, \qquad (1)$$

где Q_{delay} – штрафы за просрочку заказов; Q_{setup} – затраты на переналадки; Q_{idle} – стоимость простоев оборудования; Q_{boost} – затраты на ускорение операций.

Для решения задачи на разных временных горизонтах предложена иерархическая структура алгоритмов – стратегический уровень, тактический уровень и оперативный уровень управления (табл. 1).

1. Уровни планирования в системе оптимального управления сборочным производством

Уровень	Входные данные	Алгоритм/метод	Выходные данные
Стратегический	Множество заказов. Задействованные ресурсы. Нормативная трудоемкость	Построение дерева решений (каждый узел – частичное назначение заказов). Поиск наилучшего решения по целевой функции	Стратегический план выполнения производственной программы на 1 – 3 месяца

Продолжение табл. 1

Уровень	Входные данные	Алгоритм/метод	Выходные данные
Тактический	Стратегический план. Технологические карты операций и нормы времени. Матрица допустимости операций на смежном оборудовании. Стоимостные коэффициенты (штрафы за задержку, простои, интенсификацию)	Детализация стратегического плана на горизонт 1 – 3 недели с посменной дискретизацией	Расписание с почасовой точностью (по сменам), содержащее: – назначенный ресурс на каждую операцию; – время начала и окончания операции – величину сокращения длительности (при необходимости); – ожидаемые затраты
Оперативный	Текущее состояние элементов производственной системы (выполненные операции, статус заказов, операций, ресурсов). Базовое тактическое расписание. Поток событий от MES-системы и датчиков	Короткий горизонт планирования. Метод катящегося горизонта + событийно-ориентированный запуск. Формирование усеченной задачи для ближайшего временного окна	Скорректированное расписание

Библиографический список

1. Оптимизация цифрового управления в организационных системах / Я. Е. Львович, И. Я. Львович, О. Н. Чопоров и др. – Воронеж : Научная книга, 2021. – 191 с.

2. Шабанов, А. А. Модель и алгоритм управления совокупностью сборочного оборудования системы обеспечения механической сборки / А. А. Шабанов, Е. Э. Аверченкова, В. И. Аверченков // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 1(15). – С. 43 – 55.

3. Ларюхин, В. Б. Методы и средства сопряженного взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределенного управления ресурсами предприятия / В. Б. Ларюхин // Онтология проектирования. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 254 – 273.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

Архипова А. В. Определение местоположения объекта по точкам доступа WI-FI 3

Бегляминов Р. А., Москвитин С. П. Адаптивный энергосберегающий алгоритм маршрутизации для самоорганизующихся сетей ZigBee 5

Белан Е. А., Воробьёв В. В. Энергосберегающее управление неоднородными приемниками энергии 7

Белан Е. А., Воробьёв В. В., Кольтюков Н. А. Модель динамики электропривода гибридного транспортного средства 10

Бобылёв Р. А. Применение антенны типа «волновой канал» в сетях LoRa 11

Бобылёв Р. А. Современные моделировщики антенн: обзор численных методов и пример моделирования 13

Вагнер В. С., Слинчук С. А., Щетинин Н. Н. Матричный синтез компактной LC-модели Т-образного микрополоскового шлейфа 15

Гасанов М. Ф., Тарасов В. В., Тарасов М. В., Семенов П. В. Анализ эффективности передачи данных в гибридной сети LoRa-BLE с использованием распределенного шлюза 17

Гущин Н. А., Белан Е. А., Федосеенко И. С., Кольтюков Н. А. Энергосберегающее управление гибридными транспортными объектами 19

Дегтярев Н. А. Алгоритм дальномерного канала информационно-измерительной системы 21

Дегтярев Н. А. Алгоритм угломерного канала со случайной структурой информационно-измерительной системы 23

Дегтярев Н. А. Разработка алгоритмов функционирования измерителя дальности со случайной структурой при траекторной обработке воздушных судов 26

Дегтярев Н. А. Разработка математической модели движения воздушного судна с учетом его ориентации 28

Закиров К. А., Коршунова В. С. Проблемы реализации MASSIVE MIMO в диапазоне миллиметровых волн: аппаратные ограничения и пути их преодоления 31

Иванков А. А., Бойко Я. А. Антенна канала дистанционного управления беспилотными транспортными средствами 33

Иванков А. А., Полякова А. С. Микрополосковое согласующее устройство конической спиральной антенны 35

Иванов А. А. Оценка вычислительных затрат алгоритмов определения аномальной ошибки в навигационном вычислителе аппаратуры приема сигналов ГНСС 37

Кипаренко В. Д. Перспективы использования китайского опыта при построении систем мониторинга объектов связи в России 39
Ковалевская В. В., *Негробов В. В.* КВЧ-антенна с профилированным зеркалом 40
Котенко Я. Р., *Шералиев Т. Ш.* Влияние магнитной проницаемости материала метаструктуры на параметры метаматериального поглотителя 42
Котиков Н. М., *Горин Д. С.*, *Шатовкин Р. Р.* Цифровой двойник абонента мобильной связи 44
Кульков Д. А., *Горин Д. С.*, *Шатовкин Р. Р.* Цифровой двойник операционной системы 46
Лежнева Н. А. Информационно-измерительная система определения высоты полета летательного аппарата на основе радиовысотомера 48
Логвинов Н. А. Усовершенствование теплового метода измерения толщины материала с учетом потерь тепла в окружающую среду 50
Медведев И. С. Методы адаптивной фильтрации для разработки модели дальномерного канала в наземной РЛС 52
Медведев И. С., *Панасюк Ю. Н.* Исследование алгоритма дальномерного канала с адаптивной фильтрацией в наземной РЛС 54
Москвитина Д. Д. Оптимизация систем удаленного сбора данных приборов учета электроэнергии на базе технологии LoRaWAN 56
Останков А. В., *Скориков Н. А.* Синтез улучшенной секторной диаграммы направленности антенной решетки 59
Останков А. В., *Хрипунов Е. Г.*, *Чешенко П. В.* Метаматериальная антенна с подавлением дифракции БРЭГГА для частотного сканирования 61
Пасечников И. И., *Гасанов М. Ф.*, *Тарасов В. В.*, *Донцов С. А.* Система управления структурными характеристиками виртуальных подсетей с параллельными каналами передачи данных 63
Рыбалка В. А. Моделирование приемного тракта оптической системы связи с учетом уровня собственных шумов элементов схемы 65
Ситников А. А., *Лежанкин Б. В.* Программная модель радиолокационного канала в системе наблюдения при организации воздушного движения 67
Степанова А. В., *Чистилин Д. А.* Адаптация алгоритмов обработки сигналов в РСА к неизвестным параметрам активных помех 69
Степанова А. В., *Чистилин Д. А.* Оценка помехоустойчивости РЛС управления воздушным движением 71
Стрекалов Д. И. Применение комбинированных преобразователей для модернизации магнитного толщиномера 73
Стрекалов Д. И. Факторы, влияющие на точность измерений вихретоковым толщиномером 75
Стрекалов Д. И. Физические основы и принципы ультразвуковой толщинометрии 76

Стрекалов Д. И., Пудовкин А. П. Автоматическая калибровка магнитного толщиномера 78
Удалова А. П. Сравнительная оценка возможностей халькогенидных и галогенидных оптоволокон 79
Федосеенко И. С. Оптимизация режимов нагрева промышленной электропечи 82
Федосеенко И. С., Кольтюков Н. А. Анализ устойчивости системы управления электропечью 83
Федосеенко И. С., Кольтюков Н. А. Энергосберегающее управление промышленной электропечью 84
Хрипченко А. Е. Балластирование резонаторов газовых лазеров для авиационной техники 85
Хрипченко А. Е. Лазерные гироскопы и их пути развития и модернизации ... 86
Хрипченко А. Е. Проблема балластирования гозовых He-Ne лазеров для авиационной техники 88
Хрипченко А. Е., Пудовкин А. П. Оценка влияния приработки резонатора кольцевого лазерного гироскопа 90
Шералиев Т. Ш., Котенко Я. Р., Дронин Я. С. Обзор современных исследований метаматериалов терагерцового диапазона 91
Ширяева Н. В. Оценка весовых коэффициентов угломерного канала со случайной структурой 93
Ширяева Н. В., Панасюк Ю. Н. Алгоритм угломерного канала в вертикальной плоскости со случайной структурой двух фильтров..... 95
Шитов А. Н., Шпилёв Д. П., Беглyминов Р. А., Данилов С. Н. Исследование погрешностей фазового угломера на малых дальностях 97
Шпилёв Д. П., Шитов А. Н., Логвинов Н. А., Данилов С. Н. Исследование особенностей работы фазового угломера на малых дальностях 99

Секция 2. СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ, ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Артёмова С. В., Лемещенко С. М. Измерительный элемент в информационно-измерительной и управляющей системе контроля чистоты водорода 102
Беляев М. А., Стародубцев И. Е., Панфилов А. П. Пространственно-временной метод автоматизированного измерения импульсного отклика гитарного кабинета в неподготовленном помещении 103
Бояркин Д. С., Абузяров И. Р., Юрков Н. К. Адаптивное управление процессом перестановки затвора трубопроводной арматуры крановых узлов магистральных газопроводов 105
Бубен С. В., Родионов А. Ю. Энергоэффективное сетевое хранилище на базе одноплатного компьютера с защищенным удаленным доступом 107

Гбаго Допавоги. Автоматическая система управления освещением 109
Гбаго Допавоги. Проектирование автоматической системы управления освещением на основе обнаружения присутствия 111
Гордеев А. А. Интеграция SCADA, IIoT и цифровых двойников в системе управления электроснабжением промышленного объекта 113
Гордеев А. А. Концепция построения интеллектуальной автоматизированной системы оптимизации режимов электроснабжения промышленного предприятия 115
Ежижанский В. Д., Абузяров И. Р., Юрков Н. К. Информационно-измерительная система контроля безопасности технологических процессов на газонаполнительной станции 117
Казьмин С. К., Медведев И. П. Антенны на метаповерхностях: принципы, характеристики, применение 118
Казьмин С. К., Фомин М. А. Применение микрополосковых излучателей в дистанционном зондировании земли с учетом типа источника 120
Карих Р. Д. Влияние числа элементов СШП антенной решетки на точность оценки дальности в системе связи 122
Карих Р. Д. Методы адаптивного формирования луча в сверхширокополосных антенных решетках для систем 5G/6G 124
Ким В. А., Пащенко М. С. Обзор современных стандартов цифровой профессиональной подвижной радиосвязи 126
Клепова Е. Г., Полунина А. М., Визовитин А. С., Глотов В. В. Закрытая ТЕМ-камера для исследования электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств 128
Кольтюков А. Н. Медиапланирование в современной региональной медиасистеме: особенности реализации 129
Колядин Н. А., Попов О. Н. Исследование структурных переходов зондовым методом неразрушающего контроля 132
Коршунова В. С., Закиров К. А., Смирнов М. М. Алгоритм формирования «Электромагнитного следа» от беспроводных источников излучения 134
Косоротова С. А., Чувилькин В. С. Спутниковые технологии 136
Кочнев Д. К., Кутырев Н. С. Проводные интерфейсы в системах автоматизации: обзор основных интерфейсов 138
Крысанов Р. Д., Борисов М. Е. Радиотехника как основа современных систем связи 140
Кутырев Н. С., Кочнев Д. К. Обзор протокола умного дома LoRaWAN 141
Луцков Д. С. Структура мультиагентной информационно-измерительной и управляющей системы процессом гидротермальной карбонизации биоотходов 143
Луцков Д. С., Грибков А. Н. Имитационная модель и алгоритм управления нагревателем циклона установки гидротермальной карбонизации биоотходов 145

Нго В. К., *Нгуен В. Ф.*, *Дорохова Т. Ю.* Применение искусственного интеллекта в управлении и эксплуатации электроэнергетической системы Вьетнама 147
Нгуен В. Ф., *Нго В. К.*, *Нгуен В. Л.* Замена ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии 149
Николюкина Е. М. Структура информационной системы поддержки принятия решений по формированию оптимальной программы энергосбережения 152
Остроухов Д. Ю., *Чернышов В. Н.*, *Чернышова Т. И.* Анализ погрешностей бесконтактного адаптивного микроволнового метода и выделение доминирующих компонентов в составе полных погрешностей 154
Подать А. А., *Попов И. А.*, *Фролов П. П.* Методы обучения сверточных нейронных сетей для организации роевой (групповой) геодезической съемки на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) 156
Подать А. А., *Попов И. А.*, *Фролов П. П.* Особенности применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) для организации роевой (групповой) геодезической съемки 158
Полкунов К. А., *Чернышов Н. Г.* Архитектура компонента информационных систем для прогнозирования остаточного ресурса в режиме реального времени 160
Полкунов К. А, *Чернышов Н. Г.* Сравнительный анализ аналитических и интеллектуальных методов оценки остаточного ресурса 161
Попов Б. А., Неверов *С. С.* Нейросеть на криогенных чипах 163
Попов И. А., *Подать А. А.*, *Фролов П. П.* Прогнозирование остаточного ресурса центробежного насоса по трендам вибрации и температуры подшипников 165
Приставка А. Г., *Ким В. А.*, *Цих П. А.* Обзор программного обеспечения для расчета качественных показателей сетей передачи данных 166
Пуговкин И. Л. Когнитивное радио: к вопросу о межуровневой архитектуре сетей 169
Сайфуллозода К. С. Автоматическая идентификация и оптимизация зон низкого качества покрытия в сетях LTE-A на основе комбинированных алгоритмов кластеризации и адаптивной настройки параметров ENB 171
Сайфуллозода К. С. Применение методов расчета зон покрытия сети на основе мощности сигнала и скорости передачи данных 172
Селиванова З. М., *Гончарова А. А.*, *Альхубайши У. Ф. Ш.* Неразрушающий контроль качественных характеристик применяемых материалов при разработке радиоэлектронных средств 174
Селиванова З. М., *Шаталов Т. О.* Применение СТЕЛС-технологий в беспилотных воздушных судах 176

Смирнова М. М., Брылина С. В, Галайда Е. И. Анализ темпов интеграции новых технологий в процессы мониторинга объектов связи на территории России 178
Таёнков П. А. Динамическая адаптация модуляции и кодирования в DWDM-сетях для повышения спектральной эффективности с учетом нелинейных искажений 179
Таёнков П. А. Маршрутизация и назначение длин волн в DWDM-сетях с учетом нелинейных искажений для повышения спектральной эффективности 191
Тришаков А. А, Белоусов О. А., Муромцева М. Д. Алгоритм частотно-селективного управления мощностью передачи в многочастотных MIMO-решетках 6G для мобильных абонентов 183
Тришаков А. А., Белоусов О. А., Муромцева М. Д. Алгоритмическое обеспечение для совместной оптимизации фазовых сдвигов RIS и диаграммы направленности базовой станции в 6G-сетях 185
Тюрин И. В., Саади Ф. Анализ солнечного излучения в городе Тамбове с использованием модели XGBoost 189
Тюрин И. В., Саади Ф. Гибридное физико-ориентированное моделирование аэрозольной оптической толщины на синтетических четырехмерных данных 190
Тюрин И. В., Саади Ф. Повышение энергоэффективности гибридного солнечного водонагревателя на основе информационно-измерительной и управляющей системы 192
Тюрин И. В., Саади Ф. Сравнительный анализ PID- и адаптивного управления водонагревательной установкой 194
Умиров Т. У., Медведев И. П. Теоретические основы электромагнитного подавления гражданских беспилотных летательных аппаратов мобильными комплексами 195
Умиров Т. У., Фомин М. А. Особенности проектирования мобильных комплексов для защиты от несанкционированных БПЛА 197
Унжаков Я. С. Химические составы, применяемые в электронике 199
Утешев М. А., Белоусов О. А. Особенности применения сверхширокополосных излучателей в составе кольцевой антенной решетки 201
Утешев М. А., Белоусов О. А. Проблемы и решения при проектировании сверхширокополосных антенных решеток 203
Уютнов А. А., Грибков А. Н. Разработка мнемосхемы системы управления и мониторинга технологического процесса гидротермальной карбонизации биоотходов 204
Фомин М. А., Казьмин С. К. Анализ эффективности сверточных нейросетей в классификации и подавлении дронов 206
Фомин М. А., Умиров Т. У. Машинное обучение на основе сверточных нейронных сетей в системах предиктивного подавления гражданских беспилотных летательных аппаратов 208

Фролов П. П., *Попов И. А.*, *Подать А. А.* Искусственный интеллект в системах навигации беспилотных аппаратов гражданского назначения 210
Фролов П. П., *Попов И. А.*, *Подать А. А.* Применение искусственного интеллекта в системах радионавигации беспилотных воздушных судов (БВС) стратегического назначения 212
Цих П. А., *Приставка А. Г.* Многочастотный приемопередатчик изображений для гидроакустического канала связи 214
Чернов П. В., *Неплюева Ю. С.*, *Косырев И. С.* Построение антенных решеток с двойной поляризацией для радаров с синтезированной апертурой 216
Чернышова Т. И., *Каменская М. А.*, *Карелин П. И.* Определение метрологической исправности и метрологической надежности информационно-измерительных систем при их проектировании и эксплуатации 217
Чернышова Т. И., *Курносов Р. Ю. Магомедов Н. И.* Повышение метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем по критерию минимума вероятности метрологического отказа 220

Секция 3. МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Азарскова Е. Д. Современные наркозно-дыхательные аппараты и респираторы: технологии, производители и перспективы развития 223
Алексеев Н. О. Система замкнутого контура ЭЭГ-БОС для управления параметрами звукового стимула 225
Анохин М. А. Современное состояние рынка оборудования медицинских роботов 226
Баршутина А. С., *Баршутин С. Н.* Защищенные телемедицинские комплексы с интеграцией биотехнологических сенсоров 228
Боймирзаев А. Р., *Эргашев Р. Р.* Перспективы развития сенсорных технологий 230
Бордуков Р. В., *Фролова Т. А.* Банк учебных кейсов по диагностике неисправностей медицинской техники: интерактивная образовательная платформа 232
Ганиева Т. З. Принципы хранения лекарственных препаратов в аптеках в соответствии с требованиями стандарта GPP 234
Гасанов Р. Н., *Скачкова Д. А.* Современные слуховые аппараты: технологии, классификация и тенденции развития 236
Горянников А. А. Современное состояние рынка оборудования магнитно-резонансной томографии 237
Долгов Я. В., *Евстигнеева Е. П.*, *Судаков Д. Е.* Роль искусственного интеллекта в биопротезировании верхних конечностей 239

Евстигнеева Е. П., *Долгов Я. В.*, *Судаков Д. Е.* Аппаратная реализация прототипа таблетницы с голосовым оповещением для слабовидящих 241
Ивлиев О. А., *Потлов А. Ю.* Использование оптической когерентной томографии для изучения приповерхностных слоев и топографии поверхности кожи 242
Ильин Г. П., *Фролов С. В.* Система выделения и аннотирования патологических паттернов для машинного обучения 244
Истомин Д. А. Позитронно-эмиссионная томография 246
Казьмин Д. М. Аппараты УЗИ в современной медицине 247
Карев К. С. Приборы для измерения параметров дыхательной системы 249
Ковалева Д. Ю., *Савинова К. С.* Применение аддитивных технологий и 3D-печати для создания фантомов 250
Колотей Н. А. Разработка физического симулятора для подготовки нейроонкологов на основе 3D-печати 252
Косякина В. Д., *Фетисов В. А.* Имплантируемые биостимуляторы 254
Кузнецова А. В., *Петров И. Э.*, *Фролов С. В.* Разработка носимого устройства с гибридной архитектурой распознавания речи для компенсации слуха 255
Кузнецова А. В., *Проскурин С. Г.* Особенности применения сфигморитмографии для количественного исследования варибельности сердечного ритма 257
Леньшин С. Г. Отслеживания и визуализации актуального местоположения и траектории движения катетера эндоскопического зонда 258
Лобач Д. В. Разработка носимого устройства для коррекции осанки с акустической обратной связью 260
Любавина М. А., *Филиппов А. Д.* Программно-аппаратная реализация неинвазивного мониторинга сна и физического развития ребенка на основе сенсорных технологий 262
Любавина М. А., *Филиппов А. Д.* Физиологическая роль сна и необходимость его мониторинга в младенческом возрасте 263
Мадмарова У., *Нурмухаммедова М.* Перспективы и анализ инновационных медицинских технологии для больниц 265
Мамасодикова Н. Ю., *Мамазойитов Ш. А.* Интеграция интернета вещей и интеллектуальных датчиков в медицинские приборы 268
Моргунов Н. Р., *Сеченева Е. В.* Проектирование и создание веноскопа на базе технологий инфракрасной визуализации с применением алгоритмов цифровой обработки изображений 270
Моренец А. И., *Аристов А. А.* Формирование набора данных для моделей машинного обучения из электроэнцефалографических сигналов в задачах диагностики болезни альцгеймера 271

Нгуен Д. К., Чан Т. Л., Дорохова Т. Ю. Аппаратно-программный комплекс для оценки эмоционального стресса 273
Нурдинова Р. А., Абдуллаева С. Б. Исследование интеллектуальных систем контроля артериального давления 275
Нурдинова Р. А., Рустамов М. В. Основные аспекты продления срока службы медицинского оборудования 277
Павлов Д. В., Коробов А. А. Обзор датчика AD8232 для измерения ЭКГ в образовательных и студенческих проектах 279
Павлов Д. В., Савинова К. С. Обзор датчика MAX30100 для измерения пульса и сатурации крови в портативных медицинских устройствах 281
Панькин Д. В. Применение методов машинного обучения для создания систем поддержки принятия врачебных решений при анализе ЭКГ 283
Пелецкая Д. Г. Аппараты для поддержки кровообращения. 284
Попов И. А., Подать А. А., Фролов П. П. Нейросетевой классификатор для диагностики состояния центробежного насоса в системе промышленного мониторинга 286
Попов И. А., Фролова Т. А. Динамическая модель медицинского изделия 288
Сеченева Е. В., Моргунов Н. Р. Модель плацентарного кровообращения женщин во время беременности 289
Скачкова Д. А., Гасанов Р. Н. Современный хирургический инструментарий: классификация, тенденции и перспективы развития 291
Соломатина А. С. Искусственные клапаны сердца 293
Тадевосян Н. О. Перспективы использования нейронного обучения в бионических протезах 294
Тадевосян Н. О. Современные принципы оснащения стоматологического кабинета 296
Усенко Н. А., Фролова Т. А. Перспективы развития аппаратов магнитно-резонансной томографии 297
Усенко Н. А., Фролова Т. А. Современные аппараты для магнитно-резонансной томографии 300
Ушаков А. Ю. Математическое моделирование газообмена между кровью и легкими: обзор аналитических и численных подходов 302
Федотова Е. Н. Инновационные разработки эндоскопического медицинского оборудования 304
Фетисов В. А. Приборы, аппараты и оборудование для стоматологии 305
Шевчук М. В. Представление о дыхании с позиции теории автоматического управления 307
Шевчук М. В., Коробов А. А. Особенности механизмов регуляции дыхательной системы человека 308
Шелудякова Е. Р. Надежность передачи данных в системах дистанционного психиатрического мониторинга 310

Шестакова Т. В. Факторы, влияющие на выбор иммуноферментного анализатора для клинико-диагностической лаборатории 311
Штыркова С. Р., *Долгов Е. П.* Классификация режимов искусственной вентиляции легких и формализация параметров для интеллектуальной поддержки 313
Штыркова С. Р., *Долгов Е. П.* Факторы необходимости и современное состояние систем поддержки принятия решений при выборе режимов ИВЛ 315
Щеголев И. В., *Бессонова В. С.* Настольный анализатор условий сна 317

Секция 4. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

Антонов Е. А., *Москвитин С. П.* информационно-измерительная система со следящим фильтром с автонастройкой 319
Долгих Н. Д., *Сукачев А. И.* Формирование требований к системе оповещения 321
Иванов А. В. Контроль целостности навигационных данных в спутниковых радионавигационных системах 322
Мартынюк В. Д., *Сукачев А. И.*, *Тимофеев Д. В.* Особенности организации межсетевых компонентов для программно-аппаратного комплекса «Система мониторинга воздушного пространства» 328
Медведев И. П., *Казьмин С. К.* Метод классификации БПЛА и его ТТХ на основе радиографических изображений с использованием технологий искусственного интеллекта 330
Мордовин А. В., *Москвитин С. П.* Применение существующей инфраструктуры сетей Wi-Fi для навигации на производственных объектах 332
Попов В. В. Алгоритмы оценки координат малоразмерных маневрирующих объектов 334
Рустамов У. С., *Уткирова С. Х.* Исследование методов модификации медицинского оборудования 336
Стародубцев И. Е., *Беляев М. А.* Новые технологические решения в борьбе с акустическим загрязнением городской среды 338
Хорохорин И. В., *Пудовкин А. П.* Методология ускоренных испытаний паяных соединений электронной аппаратуры: критерии отказа и подходы к моделированию 340
Чупахин И. А., *Гребенникова Н. М.* «Умная» тележка для офиса 342
Чупахин И. А., *Демидов М. С.*, *Гребенникова Н. М.* Современный подход к подготовке пилотов БПЛА 343
Ширяева Н. В., *Панасюк Ю. Н.* Калмановский фильтр со случайной структурой 345
Эктов С. Э., *Грибков А. Н.*, *Терехова А. А.* Иерархическое оптимальное управление сборочным производством 349

Научное электронное издание

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

XI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ, ПОСВЯЩЕННАЯ ДНЮ РАДИО И СВЯЗИ

Сборник трудов
(Тамбов, 7 мая 2026 г.)

Редактирование: И. В. Калистратовой, Е. С. Мордасовой
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова
Обложка, упаковка, тиражирование Т. Ю. Зотовой

ISBN 978-5-8265-3047-4

Подписано к использованию 06.07.2026.
Тираж 100 шт. Заказ № 84

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5,
помещение 2, к. 14
Телефон: (4752) 63-81-08
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru