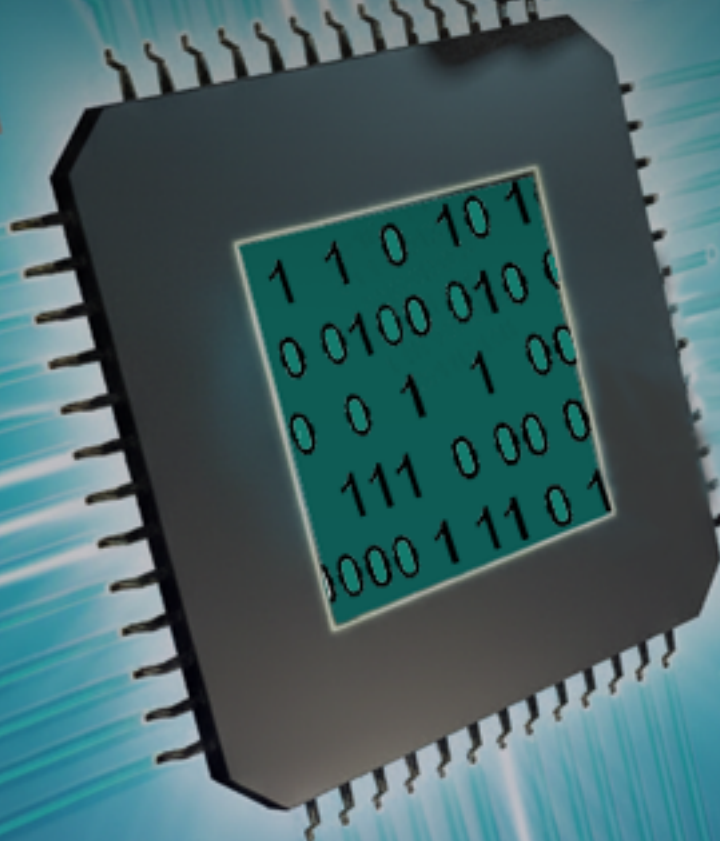


# СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ИНФОРКОММУНИКАЦИИ

2026, №2(6)



ISSN 3034-686X  
sys-engine.ru

# Системная инженерия и инфокоммуникации

№2(6), 2026

## Главный редактор

**Кутузов Денис Валерьевич**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета.

## Редакционная коллегия

**Осовский Алексей Викторович**

— выпускающий редактор, канд. техн. наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета.

**Гальперин Атём Давидович**

— начальник отдела фиксированной сети филиала ПАО МТС в Астраханской области.

**Диане Секу Абдель Кадер**

— канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории №90 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

**Камалетдинова Лилия Рашидовна**

— системный эксперт-аналитик, АО «БАРС Груп», старший преподаватель кафедры «Информационные системы», Ульяновский государственный технический университет.

**Карлова Гелия Фёдоровна**

— канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и систем связи (РСС), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

**Лаврентьев Максим Александрович**

— начальник отдела информационных технологий и связи, ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть».

**Магид Евгений Аркадьевич**

— PhD, Senior IEEE member, заведующий кафедрой интеллектуальной робототехники Института информационных технологий и интеллектуальных систем (ИТИС), Казанский (Приволжский) федеральный университет.

**Мальцева Наталия Сергеевна**

— канд. техн. наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета.

**Сипин Александр Степанович**

— доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры прикладной математики Вологодского государственного университета.

**Старов Дмитрий Владимирович**

— начальник отдела технического обеспечения научно-образовательного процесса, старший преподаватель кафедры Технологии материалов и промышленной инженерии, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева.

**Стукач Олег Владимирович**

— доктор техн. наук, профессор кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета.

**Сурков Денис Михайлович**

— канд. техн. наук, ТОО «Maritime Aid Kazakhstan», г. Актау, Республика Казахстан.

**Фролов Сергей Владимирович**

— доктор техн. наук., профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника» Тамбовского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования.

**Шилова Галина Николаевна**

— канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математики и информатики Вологодского государственного университета.

Регистрационный номер: Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.

ISSN 3034-686X

Сетевое издание размещено по адресу: [sys-engine.ru](http://sys-engine.ru)

Возрастная категория: 12+

## Содержание

<b>Робототехника</b> . . . . .	<b>4</b>
1 С.А.К. Диане, В.К. Капитонец Метод поддержания сетевой беспроводной связи в группе подвижных агентов . . . . .	4
2 А. Цвийович, Ю.А. Быковцев, С.В. Манько Гибридный алгоритм исследования неизвестной среды мобильными роботами на основе алгоритмов ABC, PSO и Voids с механизмами памяти и межстайного обмена . . . . .	11
3 А. Место, Х. Чан, С.А.К. Диане Нейросетевая система технического зрения для детектирования и трекинга канцелярских товаров . . . . .	19
<b>Автоматизация в промышленности</b> . . . . .	<b>26</b>
4 О.В. Стукач, И.А. Ершов Совершенствование технологии калибровки средств измерения электрических величин на базе модульных приборов в системе Интернета измерений (IoM) . . . . .	26
<b>Информационные технологии</b> . . . . .	<b>39</b>
5 К.А. Будников Информационная система подведения итогов успеваемости студентов по итоговым ведомостям . . . . .	39
6 Д.Д. Яхьяев, Н.Д. Куркурин, И.Ю. Кучин, Ш.Ш. Иксанов Автоматизация пропускного режима автотранспорта на территорию кампуса Астраханского государственного технического университета . . . . .	43
<b>Телекоммуникации</b> . . . . .	<b>52</b>
7 А.Е. Алишева, Н.С. Мальцева, А.В. Осовский Обеспечение непрерывной высокоскоростной беспроводной связи на основе программно-аппаратного комплекса с интеллектуальным управлением гибридными каналами . . . . .	52
8 Д.В. Кузьмин Обзор методов искусственного интеллекта для прогнозирования трафика в сетях мобильной связи . . . . .	61
9 О.Н. Пицин, Е.И. Иванова Особенности расчёта предельно допустимых потерь мощности сигнала в системах мобильной связи . . . . .	69

# Метод поддержания сетевой беспроводной связи в группе подвижных агентов

С.А.К. Диане, В.К. Капитонец

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

**Аннотация** – В работе представлена модель информационного обмена между группой подвижных агентов и предлагаемый метод поддержания сетевой беспроводной связи за счет коррекции движений мобильных ретрансляторов. Проведено имитационное моделирование и анализ особенностей движения группы автономных мобильных роботов на местности. В качестве целевых критериев эффективности системы выбраны средняя степень связанности бортовых ретрансляторов и производительность робототехнической группировки при решении задачи осмотра целевых объектов. Показано, что учет визуальной и навигационной информации агентов, а также опора на информацию о топологии сети позволяют организовать скоординированное перемещение агентов и повысить эффективность решения прикладной задачи.

**Ключевые слова** – поддержание сетевой связи, планирование движений, роботы-ретрансляторы, мультиагентная коммуникация, сетевые протоколы

## ВВЕДЕНИЕ

Зачастую при организации прикладных работ различного профиля в условиях природной среды возникает проблема обеспечения надежных каналов коммуникации между робототехническими агентами. Решение этой проблемы имеет первостепенное значение в цифровом сельском хозяйстве [1], а также в экологическом мониторинге, разведке месторождений полезных ископаемых, логистике оперативных штабов и пунктов временного размещения, формируемых на местах ликвидации чрезвычайных ситуаций, и т.д.

Характерные для этих направлений технологические задачи предполагают перемещение в пределах обширных пространств для осмотра местности, технологической обработки растений, доставки грузов и требуют применения автономных мобильных роботов (АМР) наземного или летательного типа, обладающих повышенной маневренностью, и несущих на борту развитое сенсорное, навигационное и инфокоммуникационное оснащение.

Для повышения технико-экономических показателей предприятий агропромышленного комплекса целесообразным является групповое применение АМР, когда движения агентов скоординированы и нацелены на максимизацию общего функционала эффективности [2 – 4]. Причем зачастую к агентам предъявляется ряд дополнительных требований по надежности

информационного обмена, однозначности разделения функциональных ролей, слаженности групповой работы и т.д.

Вопрос организации надежной сетевой беспроводной связи между роботами приобретает особую важность в условиях природной среды – при удаленности от городской инфокоммуникационной инфраструктуры. Ответом на данную техническую проблему может стать размещение на борту каждого агента приемопередающих устройств (ретрансляторов). Однако возникает дополнительное затруднение, поскольку движение мобильных роботов приводит к постоянному изменению топологию сети связи, что сказывается на доступности сетевых маршрутов и в итоге на качестве (скорости и надежности) передачи данных. Это обстоятельство в особенности характерно для территорий с препятствиями, перепадами рельефа, вариацией растительности.

Компенсация внутренних переменностей и внешних неопределенностей, сопровождающих организацию сетевой беспроводной связи (СБС) в группе подвижных агентов (ГПА), возможна не только через усиление характеристик аппаратного оснащения ретрансляторов (мощность, помехозащищенность, направленность), но равным образом и на алгоритмическом уровне с применением двух взаимодополняющих подходов.

Во-первых, надежность связи может быть повышена за счет грамотного выбора протоколов маршрутизации, алгоритмов динамического перестроения адресных таблиц в ретрансляторах и дублирования значимой информации, подверженной потенциальным потерям или искажениям [5 – 8].

Во-вторых, при рассмотрении групп АМР появляется возможность повысить качество связи [9, 10] посредством планирования согласованных движений роботов-ретрансляторов на местности [11 – 17].

Научно-методологической основой для воплощения вышеуказанных технических решений может служить целый ряд направлений: теория графов [18], теория систем массового обслуживания [19], агентное моделирование [20], теория игр [21], динамическое программирование [5], ситуационное управление [22], технологии машинного обучения [23].

### I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Пусть математическая модель группы роботов и построенной на их основе сети связи задается графом  $G_m$ , содержащим: узлы  $A$ ; ребра  $E$ ; комплекты данных  $D$ , ассоциированные с вершинами; настраиваемые статические параметры узлов  $X_s$  и изменяемые динамические параметры узлов  $X_d$ :

$$G_m = \{A, E, D, X_s, X_d\}. \quad (1)$$

Подобное описание применимо к достаточно широкому перечню задач в сферах разработки мультиагентных и инфокоммуникационных систем. Однако уточним его для прикладной задачи перемещения группы мобильных роботов-ретрансляторов на местности. В этом случае вершины представляют отдельных робототехнических агентов, ребра – факты установленных инфокоммуникационных соединений, ассоциированные комплекты данных – координаты роботов и таблицы маршрутизации для передачи сообщений между роботами.

Наряду с роботами в модель технологического процесса включаются целевые объекты  $O$ , подлежащие осмотру или обработке. Кроме того, учитываются информационные сообщения  $M$ , передаваемые по линиям связи. Полный перечень моделируемых сущностей приведен в Табл. I.

Отметим, что прикладную специфику и многокритериальность решаемой научной задачи можно глубже понять по Рис. 1, где в качестве примера показан случай разделения группы роботов-ретрансляторов на две несвязанных подсети:  $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$  и  $\{a_5, a_6\}$ . В таких условиях агент  $a_3$  может взять на себя одновременно две функции – движение к местоположению целевого объекта  $p_g$  и движение к точке восполнения связности беспроводной сети  $p_c$ .



Рис. 1. Схема группы мобильных агентов в режиме одновременного движения к целевым объектам и восполнения потерянных каналов связи

Аналогичных действий могут придерживаться и другие агенты. Причем на поведение системы во многом влияют параметры радиуса видимости  $r_v$ , радиуса связи  $r_c$  и радиуса безопасности  $r_s$  каждого агента.

Практическое применение такого рода мультиагентных робототехнических систем сопряжено с целым спектром научно-технических проблем, перечисленных в Табл. II.

ТАБЛИЦА I  
ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУППЫ ПОДВИЖНЫХ АГЕНТОВ

№	Элемент графа	Символ	Пояснение
1	Узлы графа	$A$	Мобильные агенты (роботы-ретрансляторы)
2	Ребра графа	$E$	Каналы связи между роботами-ретрансляторами
3	Ассоциированные данные	$D$	Идентификатор агента и сведения о внешней среде (координаты объектов, координаты роботов, флаги назначений на объекты, отметки завершенности задач)
4	Статические параметры	$X_s$	Допустимая частота ретрансляции, размер пакета, радиус связи, радиус видимости
5	Динамические параметры	$X_d$	Координаты участника сети, таблица маршрутизации
6	Информационные сообщения	$M$	Символьные последовательности, содержащие сведения о сети, агентах и технологическом процессе
7	Целевые объекты	$O$	Идентификаторы и координаты объектов, требующих осмотра роботами

ТАБЛИЦА II  
ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ СЕТЕВОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

№	Проблема	Тип	Потенциальное решение
1	Одновременность движения и информационного обмена	Многокритериальность	Ввод весовых коэффициентов, отражающих приоритет действий роботов
2	Изменчивость топологии сети связи	Переменность	Использование динамических таблиц маршрутизации
3	Неточность информации о координатах агентов	Неопределенность	Допущение о статистическом преобладании эффекта сближения роботов над величиной навигационной погрешности
4	Ограничение зоны видимости бортовой камеры агента	Ограничение	Расширение осведомленности агентов за счет взаимобмена информацией о внешней среде
5	Ограничение зоны действия бортового ретранслятора	Ограничение	Передача сообщений по цепочке из нескольких ретрансляторов и смещение агентов к лучшим позициям
6	Задержки передачи информационного сообщения	Ограничение	Допущение о малой величине задержки и статистическом преобладании эффекта сближения роботов
7	Возможность столкновения мобильных агентов	Ограничение	Применение метода потенциальных полей для уклонения роботов от столкновений

Одна из особенностей рассматриваемой задачи заключается в том, что роботы должны одновременно выполнять прикладную задачу, уклоняться от столкновений друг с другом и поддерживать связность сети. Возникает противоречие – при движении к целевой точке связь может оборваться. Это обуславливает необходимость взвешенного подхода к планированию движений агента.

Цель данной работы заключается в разработке метода поддержания сетевой беспроводной связи посредством перемещения мобильных агентов.

Гипотезой исследования является предположение о том, что при рациональном движении агентов связность сети и зависящая от нее производительность робототехнической группировки повысятся.

Отметим, что производительность  $Q$  и удельная производительность системы  $\bar{Q}$  могут быть, соответственно, измерены по формулам:

$$Q = \frac{N_o^+}{T}, \quad \bar{Q} = \frac{Q}{N_a}, \quad (2)$$

где  $N_o^+$  – число завершенных задач по осмотру объектов;  $T$  – отведенный отрезок времени; ( $N_a$  – число агентов-ретрансляторов).

Для оценки плотности соединений в графах используются такие понятия как вершинная связность, реберная связность, а также связность. Последняя характеристика наиболее удобна в расчете и хорошо применима для описания свойств сети мобильных ретрансляторов:

$$C = \frac{L}{N_a(N_a - 1)}, \quad (3)$$

где  $L$  – число прямых соединений между агентами.

## II. МЕТОД ПОДДЕРЖАНИЯ СВЯЗИ

В рамках рассматриваемой концепции организация информационного обмена неразрывно связана с выполнением прикладной задачи по осмотру множества объектов на местности. Следовательно, метод поддержания беспроводной сетевой связи в группе мобильных роботов-ретрансляторов должен учитывать многокритериальный характер решаемой задачи и может строиться на трех предлагаемых принципах.

Принцип 1. Роботы должны стремиться к предполагаемым позициям других роботов.

Принцип 2. Роботы должны синхронизировать информацию о собственных координатах и координатах целевых объектов.

Принцип 3. Поддержание связи должно иметь меньший приоритет, чем непосредственное выполнение прикладной задачи и избежание столкновений.

При соблюдении данных принципов движение мобильных робототехнических агентов в каждый момент времени организуется по формуле:

$$v_r = (k_1 v_g + k_2 v_s + k_3 v_c) v_0, \quad (4)$$

где  $v_0$  – скалярная величина номинальной скорости робота;  $v_g$  – нулевой либо единичный вектор движения к целевой точке (к ближайшему доступному объекту);  $v_c$  – нулевой либо единичный вектор движения к точке обеспечения сетевой связности;  $v_s$  – нулевой либо единичный вектор уклонения от столкновений;  $k_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  – весовые коэффициенты, причем  $k_3 < k_1$ ,  $k_3 < k_2$ .

Информация для расчета первых двух слагаемых первого множителя в формуле (4) поступает в информационно-управляющую систему робота посредством анализа данных бортовой видеокамеры в пределах радиуса видимости  $r_v$ , а также анализа формируемой на борту агента информационной модели внешней среды  $D_m \in D$ .

Остановимся подробнее на третьем слагаемом, поскольку оно имеет непосредственное отношение к повышению качества связи. Вектор, соединяющий  $i$ -го робота и ближайшую к нему точку восполнения связи, определяется из системы:

$$\begin{cases} v_{c,i} = p_{c,i} - \psi(p_{a,j}, G_m), \\ p_{c,i} = \arg \min_j \| p_{a,i} - \psi(p_{a,j}, G_m) \|, \\ j \in \{1, \dots, N_a\} \wedge j \neq i \wedge \chi(i, j) = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где  $p_{c,i}$  – целевая точка восполнения связи для  $i$ -го агента;  $p_{a,i}$  – текущее положение  $i$ -го агента;  $N_a$  – число агентов-ретрансляторов;  $\psi$  – функция распределенной оценки координат агента;  $\chi$  – функция проверки наличия соединения между двумя узлами сети;  $G_m$  – граф мобильной сети связи.

Функция  $\psi$  представляет собой итеративный и распределенный процесс по оценке координат каждого агента. Поясним, что координаты роботов сохраняются в информационных моделях внешней среды (ИМВС) агентов (по существу, в комплексах данных  $D$ ). В моменты наличия прямого канала связи происходит обмен индивидуальными ИМВС между двумя агентами. Отсутствующая или устаревшая информация о координатах роботов и целей перезаписывается данными соседа.

Функция  $\chi$  также основана на итеративном и распределенном процессе обмена данными между агентами, однако возвращает не координаты, а степень истинности утверждения о наличии сетевого маршрута между двумя узлами сети. Для работы функции необходимо динамически формировать и обновлять таблицы маршрутизации на каждом роботе. Для их

построения применялась реализация алгоритма Беллмана-Форда, схожая с протоколом RIP [5].

Обобщая физический смысл системы (5), отметим, что вектор планируемого движения каждого робота зависит от местоположения ближайшего (по евклидовой норме) информационно недоступного агента.

Проверка эффективности предложенного метода в терминах повышения показателей (2) и (3) возможна на основе комплексного имитационного моделирования СБС в ГПА согласно схеме, представленной на Рис. 1.

### III. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Имитационная модель движения АМР создавалась с применением языка программирования Python 3 и библиотек numpy, pygame, matplotlib.

Решаемая прикладная задача заключалась в осмотре различного числа  $N_o \in \{50;100\}$  целевых точек местности, расположение которых задавалось случайно в пределах участка  $40\text{м} \times 30\text{м}$ . Объект считался осмотренным, если расстояние между ним и ответственным роботом сокращалось до  $0,3\text{ м}$ . Для каждого из 5 агентов в составе группы были выбраны одинаковые радиусы безопасности, видимости и связи, равные, соответственно,  $r_s=2$ ,  $r_v=7$ ,  $r_c=10$ . Время моделирования составляло  $T=60\text{ с}$ .

Номинальная скорость агентов равнялась  $v_0=1\text{ м/с}$ . Смещение роботов на каждом шаге моделирования определялось формулой:

$$p_{new} = p_{old} + v_r \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где  $p_{new}$  – обновленное положение агента;  $p_{old}$  – исходное положение агента;  $\Delta t = 0,05\text{ с}$  – шаг времени;  $v_r$  – скорость агентов по формуле (4).

Весовые коэффициенты в формуле (4) были установлены в значения:  $k_1=1$ ,  $k_2=1$ ,  $k_3=0,5$ .

Визуализация агентов, целевых объектов и вспомогательных элементов для отладки сенсорных и инфокоммуникационных средств проводилась с применением стандартных функций по отображению геометрических примитивов. Для отрисовки информационных сообщений применялся метод обозначения передаваемой информации материальной точкой, относительное смещение которой на пути от источника к приемнику сигнала пропорционально доле переданного объема данных.

На Рис. 2 представлен начальный момент времени при проведении эксперимента, когда 5 агентов (красные окружности) инициализированы для осмотра 100 объектов внешней среды (черные квадраты). Розовые окружности обозначают зоны связи, зеленые – зоны видимости агентов. Каналы связи показаны синим цветом.

В свою очередь, на Рис. 3 представлен фрагмент моделирования ГПА в момент времени, когда существенная часть объектов уже осмотрена (окрашена зеленым цветом). На изображении видны 3 изолированных подгруппы роботов.

Без ущерба основной задаче – осмотру оставшихся объектов – агенты каждой подгруппы имеют намерение смещаться в направлении красных отрезков к предполагаемым координатам нахождения других ретрансляторов. Неточность оценки этих координат обусловлена существенными задержками, а также нерегулярностью обновления информационных моделей внешней среды на борту каждого агента. Однако общее направление требуемого движения определено вполне корректно.

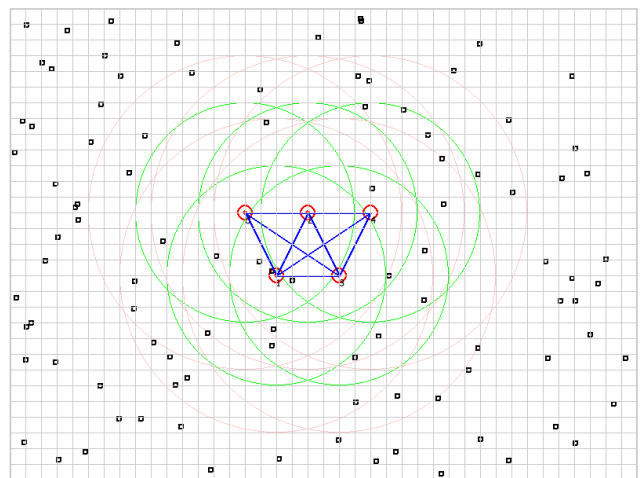


Рис. 2. Отображение начального положения роботов и целевых объектов, совмещенное с визуализацией сенсорных зон и линий связи

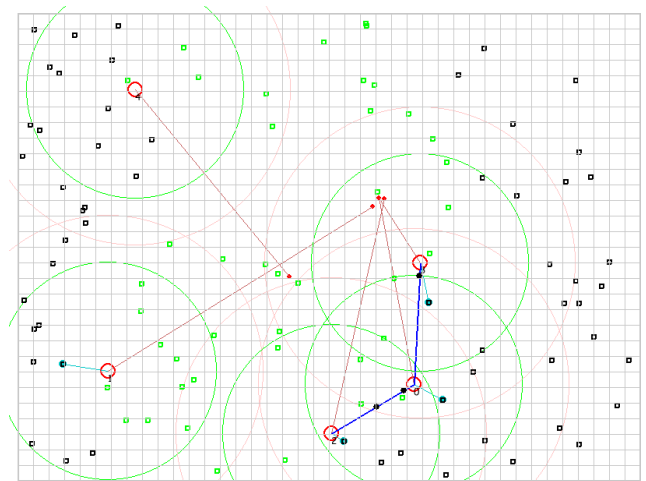


Рис. 3. Смещенные положения роботов в середине выполнения прикладной задачи и намеченные переходы к точкам восполнения связи

Обобщенная оценка эффективности системы, учитывающая как связанность группы роботов, так и фактическую производительность опиралась на (2) и (3). Ее значение определялось по формуле:

$$F = Q \cdot C \quad (7)$$

На Рис. 4 представлены графики производительности и связанности группы агентов для различных значений логической переменной  $b_c$ , регламентирующей активность режима восполнения потерянных каналов связи согласно предложенному методу.

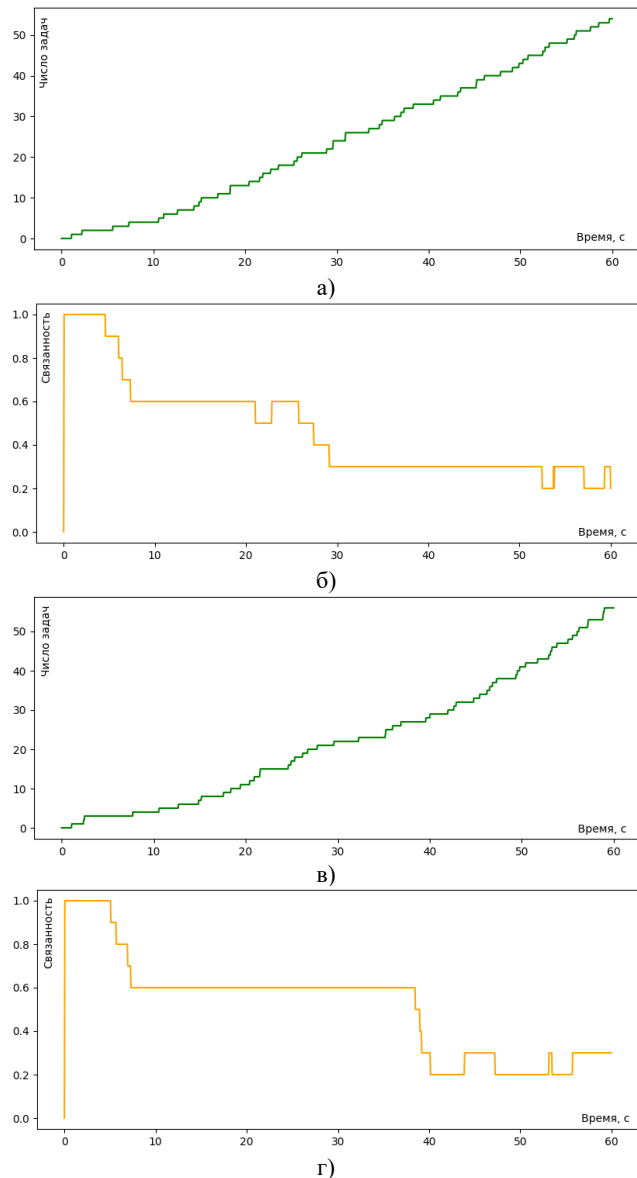


Рис. 4. Графики эффективности ГПА с СБС для 100 целей: а) зависимость  $Q(t)$  при  $b_c=0$ ; б) зависимость  $C(t)$  при  $b_c=0$ ; в) зависимость  $Q(t)$  при  $b_c=1$ ; г) зависимость  $C(t)$  при  $b_c=1$

Число обработанных объектов, как и следовало ожидать, растет с течением времени. Связанность же группы падает, что отражает стремление роботов покрыть как можно большую территорию в процессе осмотра объектов.

Тем не менее, режим восполнения утраченных соединений в группе роботов-ретрансляторов отличается более высоким средним показателем

связанности: (0,515 на Рис. 4, г против 0,468 на Рис. 4, б). Кроме того, производительность также несколько повышается (56 решенных задач на Рис. 4, в против 54 решенных задач на Рис. 4, а).

Общий размер переданной информации для серии экспериментов с 5 агентами и 100 целевыми объектами составил 86,4 Кб в базовом режиме и 109,6 Кб в режиме поддержания связи.

Результаты трех серий проведенных экспериментов по запуску ГПА, оснащенной СБС, на местности с различным числом целевых объектов сведены в Табл. III. При запуске системы чередовались значения логической переменной  $b_c$ .

ТАБЛИЦА III  
РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Метрика Знач.	$N_a$	$N_o$	$T, c$	$b_c$	$Q, c^{-1}$	$\bar{Q}, c^{-1}$	$C$	$F$
	Эксп. 1	5	25	60	0	0,183	0,037	0,373
Эксп. 2	5	25	60	1	0,250	0,050	0,535	0,134
Эксп. 3	5	50	60	0	0,416	0,083	0,485	0,202
Эксп. 4	5	50	60	1	0,433	0,087	0,589	0,255
Эксп. 5	5	100	60	0	0,899	0,180	0,468	0,421
Эксп. 6	5	100	60	1	0,933	0,187	0,515	0,481

Анализируя четыре последние колонки таблицы с метриками эффективности, можно отметить, что при прочих равных условиях включение режима восстановления потерянных каналов связи приводит к росту связанности сети ретрансляторов, улучшению производительности группы мобильных роботов и повышению обобщенной метрики эффективности (7).

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были разработаны математическая модель и метод поддержания сетевой беспроводной связи в группе подвижных агентов-ретрансляторов.

Особенностью предлагаемой модели и метода является их опора как на сенсорно-поведенческие, так и на коммуникационные механизмы обеспечения единства информационного пространства роботов.

На протокольном уровне построение таблиц маршрутизации реализуется с применением алгоритма Беллмана-Форда, что обеспечивает гибкость, децентрализованность системы.

На управленческом уровне компромисс между перемещением роботов к целевым позициям и движением к точкам наилучшей ретрансляции достигается за счет экспертного выбора соответствующих весовых коэффициентов.

Экспериментальные исследования полностью подтвердили положительный эффект от внедрения предлагаемого метода поддержания связи, что проявляется в повышении связанности СБС и производительности ГПА при решении прикладной задачи осмотра объектов на местности.

Дальнейшие направления развития представленного подхода связаны с рассмотрением его эффективности в средах с протяженными статическими и динамическими препятствиями, понижающими дальность действия бортовых приемо-передающих устройств.

Кроме того, интерес представляет применение аналитических и эвристических оптимизационных методов к поиску группового вектора перемещений агентов, максимизирующего степень связанности системы на заданном временном горизонте.

Еще одним вопросом, требующим дополнительного внимания, является анализ влияния радиуса видимости и радиуса связи на ключевые метрики эффективности беспроводной системы связи.

В среднесрочной и долгосрочной перспективе весьма актуален поиск новых алгоритмов интеллектуальной маршрутизации данных [23] с внедрением элементов самообучения и прогноза.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Диане С.А.К., Андропова А.А., Дудка Н.Н., Молев Н.С., Душков Д.Д. Моделирование автономных квадрокоптеров в типовых задачах агропромышленного сектора // Системная инженерия и инфокоммуникации, 2025, №2, С. 4-9.
- [2] Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
- [3] Yang G., An L., Zhao C. Collision/Obstacle Avoidance Coordination of Multi-Robot Systems: A Survey // Actuators. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Art. 85.
- [4] Рожнов А.В., Шевцов С.Н., Кротов В.А., Капитонец В.К. Исследование двунаправленной координации и отказоустойчивого управления гетерогенными группами // Перспективные системы и задачи управления: сборник трудов XXI Всероссийской научно-практической конференции и XVII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах», 2026. – С. 45-48.
- [5] Hedrick C. L. Routing Information Protocol // RFC 1058. – 1988.
- [6] Moy J. OSPF Version 2 // RFC 2328. — Internet Engineering Task Force, 1998.
- [7] Kaur G., Thakur P. Routing Protocols in MANET: An Overview // 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, India, 2019, pp. 935-941.
- [8] Lin D., Lin Z., Kong L., Guan Y. L. CMSTR: A Constrained Minimum Spanning Tree Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // Ad Hoc Networks. – 2023. – Vol. 146. – Art. 103160. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103160.
- [9] Han S. I., Baek J. Optimal UAV Deployment and Resource Management in UAV Relay Networks // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 20. – Art. 6878.
- [10] García-Gil S., Murillo J. M., Galán-Jiménez J. Enabling Ultra Reliable Low Latency Communications in Rural Areas Using UAV Swarms // Ad Hoc Networks. – 2024. – Vol. 163. – Art. 103603.
- [11] Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Собольников С. А. Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 11. – С. 27–32.
- [12] Диане С.А.К., Исахов А.Ю., Исахова А.О. Алгоритм сетевцентричного управления движением группы мобильных роботов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, №1. – С. 1-11.
- [13] Le D. V., Oh H., Yoon S. RoCoMAR: Robots' Controllable Mobility Aided Routing and Relay Architecture for Mobile Sensor Networks // Sensors. – 2013. – Vol. 13, No. 7. – P. 8695–8721.
- [14] Vassilaras S., Abosi C. E., Yovanof G. S. Shortest route mobility assisted packet delivery with soft maximum delay guarantees in mobile ad hoc networks // Ad Hoc Networks. – 2012. – Vol. 10, No. 6. – P. 886–900.
- [15] Kawecki M., Schoeneich R. O. Mobility-based routing algorithm in Delay Tolerant Networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – Vol. 2016. – Art. 81.
- [16] Zhu Q., Zhou R., Zhang J. Connectivity Maintenance Based on Multiple Relay UAVs Selection Scheme in Cooperative Surveillance // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – Art. 8.
- [17] Zhu L., Ma C., Li J., Lu Y., Yang Q. Connectivity-Maintenance UAV Formation Control in Complex Environment // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 4. – Art. 229.
- [18] Лохин В.М., Манько С.В., Карпов С.А., Марголин И.Д. Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах. Мехатроника, автоматизация, управление. 2017;18(12): 802–811.
- [19] Барабанова Е.А., Вытовтов К.А. Аналитический метод исследования поведения системы массового обслуживания при скачкообразно-изменяющихся потоках информации // Физические основы приборостроения. 2021. Т. 10. № 1 (39). С. 36-47.
- [20] Кузнецов А. В. Моделирование системы связи агентов, движущихся по пересечённой местности // Челябинский физико-математический журнал. 2018. Т. 3, вып. 2. С. 237-248.
- [21] Kuznetsov A.V. Game of operation of a telecommunication network of agents with directional antennae. Mathematical Game Theory and Applications, 12(3), 2020, P. 19-49.
- [22] Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus). 2019. P. 479–484.
- [23] Кутузов Д.В., Осовский А.В., Старов Д.В., Мальцева Н.С., Перова К.В. Анализ и прогнозирование трафика современных телекоммуникационных систем на основе методов искусственного интеллекта // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ., 2024, № 1, С. 73–87.

## Информация об авторах

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаб. №90 ИПУ РАН, доцент кафедры проблем управления РТУ МИРЭА, Москва, Россия, e-mail: [diane1990@yandex.ru](mailto:diane1990@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-8690-6422.

Капитонец Виктория Кирилловна, математик ИПУ РАН, Москва, Россия, e-mail: [vikapitonets01@mail.ru](mailto:vikapitonets01@mail.ru).

A method for maintaining wireless network communication in a group of mobile agents

Sekou Diane, Victoria Kapitonets

*Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia*

**Abstract** – The paper presents a model of information exchange between a group of mobile agents and a proposed method for maintaining a wireless network connection by correcting the movements of mobile repeaters. Simulation modeling and analysis of the movement specifics of a group of autonomous mobile robots on the ground have been carried out. The target criteria for the effectiveness of the system are the average connectance of on-board repeaters and the performance of the robotic group when solving the task of inspecting target objects. It is shown that taking into account the visual and navigation information of agents, as well as relying on information about the network topology, make it possible to organize coordinated movement of agents and increase the efficiency of solving an applied problem.

**Keywords** – *maintaining network communication, motion planning, repeater robots, multi-agent communication, network protocols.*

## REFERENCES

- [1] Diane S.A.K., Andronova A.A., Dudka N.N., Molev N.S., Dushkov D.D. Modeling autonomous quadcopters in typical tasks of the agro-industrial sector // System Engineering and Infocommunications, 2025, No. 2, pp. 4-9. (In Russian).
- [2] Kalyaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Models and algorithms of collective management in groups of robots. Moscow: Fizmatlit, 2009. 278 P. (In Russian).
- [3] Yang G., An L., Zhao C. Collision/Obstacle Avoidance Coordination of Multi-Robot Systems: A Survey // Actuators. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Art. 85.
- [4] Rozhnov A.V., Shevtsov S.N., Krotov V.A., Kapitonets V.K. Study of bidirectional coordination and fault-tolerant management of heterogeneous groups // Promising management systems and tasks: proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Practical Conference and the XVII Youth School seminar "Management and information processing in technical systems", 2026, pp. 45-48. (In Russian).
- [5] Hedrick C. L. Routing Information Protocol // RFC 1058. – 1988.
- [6] Moy J. OSPF Version 2 // RFC 2328. — Internet Engineering Task Force, 1998.
- [7] Kaur G., Thakur P. Routing Protocols in MANET: An Overview // 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kannur, India, 2019, pp. 935-941.
- [8] Lin D., Lin Z., Kong L., Guan Y. L. CMSTR: A Constrained Minimum Spanning Tree Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // Ad Hoc Networks. – 2023. – Vol. 146. – Art. 103160. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103160.
- [9] Han S. I., Baek J. Optimal UAV Deployment and Resource Management in UAV Relay Networks // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 20. – Art. 6878.
- [10] García-Gil S., Murillo J. M., Galán-Jiménez J. Enabling Ultra Reliable Low Latency Communications in Rural Areas Using UAV Swarms // Ad Hoc Networks. – 2024. – Vol. 163. – Art. 103603.
- [11] Gradetsky V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Sobolnikov S. A. Building mobile communication networks based on ground-based autonomous mobile robots // Mechatronics, automation, control. - 2011. – No. 11. – pp. 27-32. (In Russian).
- [12] Diane S.A.K., Iskhakov A.Yu., Iskhakova A.O. Algorithm of network-centric motion control of a group of mobile robots // Modeling, optimization and information technologies. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – pp. 1-11. (In Russian).
- [13] Le D. V., Oh H., Yoon S. RoCoMAR: Robots' Controllable Mobility Aided Routing and Relay Architecture for Mobile Sensor Networks // Sensors. – 2013. – Vol. 13, No. 7. – P. 8695–8721.
- [14] Vassilaras S., Abosi C. E., Yovanof G. S. Shortest route mobility assisted packet delivery with soft maximum delay guarantees in mobile ad hoc networks // Ad Hoc Networks. – 2012. – Vol. 10, No. 6. – P. 886–900.
- [15] Kawecki M., Schoeneich R. O. Mobility-based routing algorithm in Delay Tolerant Networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – Vol. 2016. – Art. 81.
- [16] Zhu Q., Zhou R., Zhang J. Connectivity Maintenance Based on Multiple Relay UAVs Selection Scheme in Cooperative Surveillance // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – Art. 8.
- [17] Zhu L., Ma C., Li J., Lu Y., Yang Q. Connectivity-Maintenance UAV Formation Control in Complex Environment // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 4. – Art. 229.
- [18] Lokhin V.M., Manko S.V., Karpov S.A., Margolin I.D. Behavioral mechanisms of network communication in multi-agent robotic systems. Mechatronics, automation, control. 2017;18(12): 802–811. (In Russian).
- [19] Barabanova E.A., Vytovtova KA. An analytical method for investigating the behavior of a queuing system under intermittently changing information flows // Physical foundations of instrumentation. 2021. Vol. 10. No. 1 (39). pp. 36-47. (In Russian).
- [20] Kuznetsov A.V. Modeling of the communication system of agents moving over rough terrain // Chelyabinsk Physico-Mathematical Journal. 2018. Vol. 3, issue. 2. Pp. 237-248. (In Russian).
- [21] Kuznetsov A.V. Game of operation of a telecommunication network of agents with directional antennae. Mathematical Game Theory and Applications, 12(3), 2020, P. 19-49.
- [22] Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoN Rus). 2019. P. 479–484.
- [23] Kutuzov D.V., Osovsky A.V., Starov D.V., Maltseva N.S., Perova K.V. Traffic analysis and forecasting of modern telecommunication systems based on artificial intelligence methods // Vestn. Astrakhan State Technical University Uni. Ser. management, computing technology inform., 2024, No. 1, pp. 73-87. (In Russian).

## Information about authors

Sekou Abdel Kader Diane, PhD (Engineering), Senior Researcher at ICS of RAS, Associate Professor of Control Problems Department at RTU MIREA, Moscow, Russia, e-mail: [diane1990@yandex.ru](mailto:diane1990@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-8690-6422.

Victoria Kirillovna Kapitonets, mathematician at the ICS of RAS, Moscow, Russia, [vikapitonets01@mail.ru](mailto:vikapitonets01@mail.ru).

# Гибридный алгоритм исследования неизвестной среды мобильными роботами на основе алгоритмов ABC, PSO и Voids с механизмами памяти и межстайного обмена

А. Цвийович, Ю.А. Быковцев, С.В. Манько

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия*

**Аннотация** — Работа посвящена задаче автономного исследования неизвестной среды группой мобильных роботов при наличии препятствий, ограниченной связи и отсутствии априорной карты местности. Предложен гибридный алгоритм, который объединяет метод пчелиной колонии, алгоритм роя частиц, локальные правила Voids, феромонную память и межстайный обмен перспективными областями. Численные эксперименты показали, что предложенный подход повышает полноту покрытия области, уменьшает избыточность повторных посещений, снижает число столкновений и ускоряет достижение целей по сравнению с базовыми режимами движения. Полученные результаты важны для дальнейшей разработки распределённых систем мониторинга, поисково-спасательных комплексов и групповых робототехнических платформ, работающих в заранее неизвестной среде.

**Ключевые слова** – стайная робототехника, автономное исследование среды, феромонная память, рой частиц, локальная координация.

## ВВЕДЕНИЕ

Автономное исследование неизвестной среды является одной из ключевых задач современной мобильной робототехники. Такие задачи возникают при мониторинге труднодоступных территорий, обследовании аварийных зон, поисково-спасательных операциях и разведке пространств, для которых отсутствует заранее построенная карта. В подобных условиях особенно перспективны многоагентные и стайные подходы, поскольку они обеспечивают масштабируемость, отказоустойчивость и возможность распределённого покрытия области.

Среди наиболее известных биоинспирированных методов для решения задач планирования и координации выделяются метод пчелиной колонии (ArtificialBeeColony, ABC), алгоритм роя частиц (ParticleSwarmOptimization, PSO) и модель стайного поведения Voids [1–3]. Метод пчелиной колонии

используется для глобального поиска перспективных направлений, алгоритм роя частиц – для локального уточнения решения, а модель Voids – для согласования движения соседних агентов. При этом отдельное применение каждого из указанных подходов не всегда позволяет одновременно обеспечить эффективную разведку новых областей, устойчивость к локальным минимумам и согласованность движения группы. Поэтому актуальна разработка гибридных алгоритмов, сочетающих преимущества глобального поиска, локальной оптимизации и распределённой координации [4–7].

Механизмы памяти и забывания являются важной частью коллективных алгоритмов, поскольку позволяют уменьшать число повторных посещений уже исследованных ячеек и перераспределять движение роботов в сторону менее изученных областей [8–12]. На этой основе в работе предлагается гибридный алгоритм автономного исследования, объединяющий метод пчелиной колонии, алгоритм роя частиц, правила Voids и межстайный обмен перспективными ячейками.

**Цель работы** состоит в разработке и исследовании гибридного алгоритма автономного исследования неизвестной среды мобильными роботами с использованием методов глобального поиска, локальной координации и механизмов памяти.

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается свободная часть двумерной среды  $\mathcal{E}_{\text{free}} \subset \mathbb{R}^2$ . Пусть  $e \in \mathcal{E}_{\text{free}}$  обозначает точку среды,  $r_k \in \mathcal{R} = \{r_k\}_{k=1}^N$  –  $k$ -го мобильного робота,  $o_m \in \mathcal{O} = \{o_m\}_{m=1}^M$  –  $m$ -е препятствие, а  $g_q \in \mathcal{G} = \{g_q\}_{q=1}^Q$  –  $q$ -ю целевую область. Среда дискретизируется равномерной сеткой из ячеек  $(i, j)$  с шагом  $h$ . Для каждого робота  $r_k$  задаются положение  $\mathbf{p}_k(t) \in \mathbb{R}^2$  и скорость  $\mathbf{v}_k(t) \in \mathbb{R}^2$  на шаге  $t$ .

Требуется построить такие траектории  $\{\mathbf{p}_k(t)\}_{t=0}^T$ , которые обеспечивают максимальное покрытие

свободной области, минимальную избыточность повторных посещений, своевременное обнаружение целей и минимальное число коллизий. Эту задачу целесообразно записать в виде многофакторной оптимизации

$$J = \lambda_1 C - \lambda_2 R + \lambda_3 Q + \lambda_4 E - \lambda_5 K - \lambda_6 T \rightarrow \max,$$

где  $C$  – покрытие области,  $R$  – избыточность повторных посещений,  $Q$  – доля найденных целей,  $E$  – остаток энергии  $K$  – число коллизий,  $T$  – время завершения исследования,  $\lambda_1, \dots, \lambda_6 \geq 0$  – весовые коэффициенты критериев. Включение критерия  $E$  со знаком «плюс» соответствует стремлению сохранить как можно больший остаток энергии, что эквивалентно минимизации энергозатрат.

Используемые в работе метрики – покрытие области, избыточность повторных посещений, доля найденных целей, остаток энергии, число коллизий и время завершения исследования, – определяются следующими выражениями:

$$C = \frac{|V_T|}{|\mathcal{E}_{\text{free}}|}, \quad V_T = \{(i, j) \in \mathcal{E}_{\text{free}} \mid n_{ij}(T) > 0\},$$

$$R = \frac{\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}_{\text{free}}} \max(0, n_{ij}(T) - 1)}{\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}_{\text{free}}} n_{ij}(T)},$$

$$Q = \frac{Q_{\text{found}}}{Q}, \quad \varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{E_k^{\text{rem}}}{E_k^0},$$

$$K = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^N I(\min_m \|p_k(t) - p_m^0\| < d_{\text{safe}})$$

$$\forall_{l \neq k} \min \|p_k(t) - p_l(t)\| < d_{\text{safe}}, \quad T = T_{\text{comp}} \Delta t,$$

где  $n_{ij}(T)$  – число посещений ячейки  $(i, j)$  к моменту  $T$ ,  $Q_{\text{found}}$  – число обнаруженных целей,  $E_k^{\text{rem}}$  и  $E_k^0$  – остаточная и начальная энергия робота  $r_k$ ,  $p_m^0$  – положение препятствия  $o_m$ ,  $d_{\text{safe}}$  – безопасное расстояние,  $T_{\text{comp}}$  – число шагов до завершения исследования,  $\Delta t$  – шаг моделирования.

Входными данными алгоритма является пустая координатная сетка, текущие положения роботов, положения препятствий и набор целевых точек. Выходом алгоритма является последовательность промежуточных и конечных точек движения каждого робота, обеспечивающая исследование пространства с минимальной избыточностью траекторий. Численные эксперименты выполнялись на программной модели со следующими параметрами: поле  $20 \times 20$  м, сетка  $40 \times 40$

ячеек, девять препятствий радиуса 0,7–1,2 м, 15–18 целей, четыре робота, 350 шагов симуляции при  $\Delta t = 0,05$ .

## II. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Ниже приведены основные режимы работы алгоритма, используемые в статье. Их разделение необходимо, поскольку в разделе результатов сравниваются не только разные численные параметры, но и различные принципы организации движения роботов.

*Базовый режим (baseline mode)* – это режим случайного блуждания, в котором каждый робот выбирает следующее направление движения без коллективной памяти, без локальной координации и без обмена перспективными ячейками. Такой режим используется как исходная точка сравнения, позволяющая оценить выигрыш от введения более сложных механизмов управления.

*Гибридный режим ABC–PSO* – это режим, в котором глобальный выбор перспективной области выполняется методом пчелиной колонии, а локальное уточнение точки движения – алгоритмом роя частиц. В этом режиме дополнительно используется феромонная память, уменьшающая вероятность повторного движения по уже хорошо исследованному участку.

*Согласованный режим движения (coordinated mode)* – это режим, при котором роботы формируют траектории не независимо, а с учётом взаимного положения, взаимных скоростей и риска пересечения путей. Иными словами, каждый агент учитывает не только собственную цель, но и движение соседей.

*Схема “ведущий–ведомый” (leader–follower)* – это способ распределения ролей в согласованном режиме, при котором один робот временно выступает в роли ведущего и задаёт основное направление движения, а второй робот выступает в роли ведомого и корректирует свою траекторию относительно ведущего. Такая схема используется для уменьшения конфликтов при движении в стеснённом пространстве.

*Режим одной стаи (single-swarm mode)* – это режим, в котором все роботы работают как одна группа и используют единое поле феромонной памяти. Обмен информацией в этом случае происходит только внутри одной стаи.

*Режим двух стай с межстайным обменом (dual-inter-swarm mode)* – это режим, в котором роботы делятся на две подгруппы, каждая из которых исследует среду с опорой на собственную феромонную сетку. Через фиксированные интервалы времени между подгруппами выполняется *межстайный обмен (inter-swarm exchange)*, то есть передача информации о наиболее перспективных ячейках. Такой режим позволяет сократить дублирование действий и ускорить обнаружение ещё не исследованных областей.

После первого введения все перечисленные режимы далее по тексту описываются преимущественно на русском языке: базовый режим, согласованный режим, схема “ведущий–ведомый”, режим одной стаи и режим двух стай с межстайным обменом.

### III. ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ

#### A. Глобальный поиск и локальная оптимизация

В фазе глобальной разведки используется метод пчелиной колонии (*Artificial Bee Colony*, ABC). В рамках этого метода набор роботов трактуется как коллектив агентов-разведчиков, выбирающих наиболее перспективные области пространства. Для каждой ячейки  $(i, j)$  вычисляется её привлекательность, то есть численная оценка того, насколько целесообразно направить туда робота на следующем шаге. Эта оценка задаётся функцией

$$F_{ij} = \alpha (1 - \hat{n}_{ij}) + \beta \hat{\varphi}_{ij} + \gamma (1 - \hat{d}_{ij}), \quad (1)$$

где  $\hat{n}_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_{\max}}$  — нормированное число посещений ячейки,  $n_{ij} \equiv \text{visits}(i, j)$ ;  $\hat{\varphi}_{ij} = \frac{\varphi_{ij}}{\varphi_{\max}}$  — нормированное значение феромона,  $\varphi_{ij} \equiv \text{pheromone}(i, j)$ ;  $\hat{d}_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{\max}}$  — нормированное расстояние до ближайшей целевой области;  $\alpha, \beta, \gamma$  — весовые коэффициенты. В расчётах использовались значения  $\alpha = 0,6$ ,  $\beta = 0,3$ ,  $\gamma = 0,1$ , причём  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ , что обеспечивает нормированное распределение вкладов между тремя факторами.

Здесь  $n_{ij}$  показывает, сколько раз роботы уже посещали ячейку  $(i, j)$ , а  $\varphi_{ij}$  отражает накопленную феромонную память в этой же ячейке. Величина  $d_{ij}$  означает расстояние от рассматриваемой ячейки до ближайшей целевой области. Чем больше  $n_{ij}$ , тем менее привлекательной считается уже исследованная область. Чем больше  $\varphi_{ij}$ , тем сильнее коллективная память роботов подсказывает важность данной ячейки. Чем меньше расстояние  $d_{ij}$  до цели, тем выше вероятность, что движение в направлении данной ячейки ускорит обнаружение ещё не найденной цели. Следовательно, формула (1) объединяет три фактора: новизну области, коллективную память и близость к цели.

Локальная оптимизация выполняется алгоритмом роя частиц (*Particle Swarm Optimization*, PSO). Под роем понимается множество решений, каждое из которых интерпретируется как отдельная частица. Частица описывается парой векторов состояния, где  $\mathbf{x}_s$  — положение кандидата в пространстве поиска, а  $\mathbf{u}_s$  — его скорость, задающая направление и величину изменения положения. Рой представляется как множество

$$\mathcal{S} = \{(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)\}_{s=1}^{N_p},$$

где  $N_p$  — число частиц в рое. Для каждой частицы сохраняется лучшее найденное положение  $\mathbf{R}_b^{(s)}$ , то есть лучшая точка, найденная именно данной частицей, а для всего роя — глобально лучшее положение  $\mathbf{G}_b$ , то есть лучшая точка, найденная хотя бы одной частицей. Обновление выполняется по формулам

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s^+ &= \omega \mathbf{u}_s + c_1 r_1 (\mathbf{R}_b^{(s)} - \mathbf{x}_s) + c_2 r_2 (\mathbf{G}_b - \mathbf{x}_s), \\ \mathbf{x}_s^+ &= \mathbf{x}_s + \mathbf{u}_s^+, \end{aligned}$$

где  $\omega$  — коэффициент инерции, отвечающий за сохранение предыдущего направления движения частицы;  $c_1$  — коэффициент личного влияния, определяющий степень притяжения к положению  $\mathbf{R}_b^{(s)}$ ;  $c_2$  — коэффициент коллективного влияния, определяющий степень притяжения к положению  $\mathbf{G}_b$ ;  $r_1, r_2 \in [0, 1]$  — случайные множители; верхний индекс “+” обозначает значение на следующем шаге итерации. Таким образом, каждая частица движется с учётом инерции, собственного лучшего опыта и лучшего опыта, накопленного всем роем.

Координаты частицы, выбранной методом PSO, переводятся в глобальные координаты функцией отображения в глобальную систему координат. Эта операция реализуется как композиция двух матриц перехода в однородных координатах:

$$\tilde{\mathbf{p}}_{ij}^g = \mathbf{T}_{gr}(\theta_r, \mathbf{p}_r) \mathbf{T}_{rm}(h) \tilde{\mathbf{c}}_{ij},$$

где  $\tilde{\mathbf{p}}_{ij}^g$  — координаты  $j$ -й точки, полученной  $i$ -м роботом, в глобальной системе координат в форме однородного вектора,  $\mathbf{T}_{gr}(\theta_r, \mathbf{p}_r)$  — матрица перехода из локальной системы координат робота в глобальную систему,  $\mathbf{T}_{rm}(h)$  — матрица перехода от индексов сетки к локальным метрическим координатам с шагом  $h$ ,  $\tilde{\mathbf{c}}_{ij} = [j + 0,5, i + 0,5, 1]^T$  — вектор центра ячейки в индексном представлении,

$$\mathbf{T}_{rm}(h) = \begin{bmatrix} h & 0 & 0 \\ 0 & h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{gr}(\theta_r, \mathbf{p}_r) = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r & p_{r,x} \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r & p_{r,y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $\theta_r$  — ориентация робота,  $\mathbf{p}_r = [p_{r,x}, p_{r,y}]^T$  — положение робота в глобальной системе координат. Таким образом, сначала индекс ячейки переводится в метрические координаты локальной карты, а затем — в глобальные координаты рабочей области.

Следовательно, функция `cell2world` возвращает глобальную точку маршрута, соответствующую выбранной ячейке.

Структура алгоритма роя частиц, используемого на этапе локальной оптимизации, приведена на Рис. 1.

В блоке проверки условия остановки используется ограничение по максимальному числу итераций.

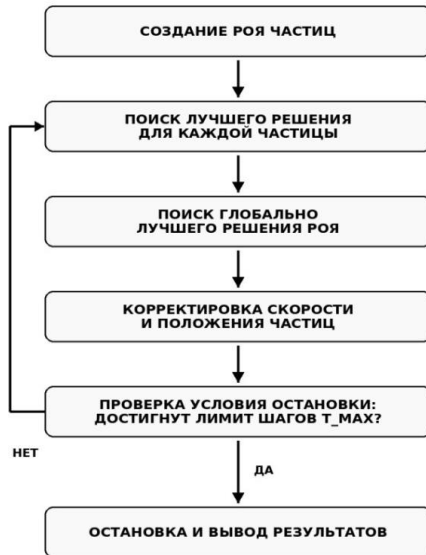


Рис. 1. Этапы алгоритма роя частиц, используемого при локальной оптимизации направления движения

### В. Феромонная память и режимы одной и двух стай

Коллективная память реализуется в виде феромонной сетки  $\varphi_{ij}$  размера  $40 \times 40$ . Под феромонной сеткой понимается поле значений, связанное с ячейками карты и отражающее накопленный коллективный опыт исследования. При посещении ячейки робот увеличивает значение феромона по правилу:

$$\varphi_{ij} \leftarrow \min(\varphi_{\text{cap}}, \varphi_{ij} + \Delta\varphi), \quad (2)$$

а затем на каждом шаге моделирования применяется испарение:

$$\varphi_{ij} \leftarrow \varphi_{ij}(1 - \rho), \quad (3)$$

где  $\varphi_{\text{cap}}$  – верхний предел насыщения феромона;  $\Delta\varphi$  – величина приращения после посещения ячейки;  $\rho$  – коэффициент испарения. Символ  $\leftarrow$  обозначает операцию присваивания, то есть обновление текущего значения переменной новым значением, вычисленным по правой части. Формула (2) увеличивает значение феромона, но не позволяет ему превысить заданный предел  $\varphi_{\text{cap}}$ , а формула (3) постепенно уменьшает все значения феромона во времени. В численных экспериментах использовалось значение  $\rho = 0,025$ .

В режиме одной стаи используется одна общая феромонная сетка, доступная всем роботам. В режиме двух стай с межстайным обменом применяются две феромонные сетки:  $\varphi_{ij}^A$  для стаи *A* и  $\varphi_{ij}^B$  для стаи *B*. Через каждые 35 шагов между стаями передаются десять ячеек с наибольшими значениями функции привлекательности  $F_{ij}$ . Иначе говоря, каждая стая ведёт собственную память, но периодически сообщает другой стае, какие области в данный момент считаются наиболее перспективными. Поэтому таблица результатов для режима двух стай с межстайным обменом напрямую связана с данным теоретическим описанием.

Общая схема обновления феромонной памяти показана на Рис. 2. Концепция построена по мотивам работ по феромонным полям в роевой робототехнике [8, 12].

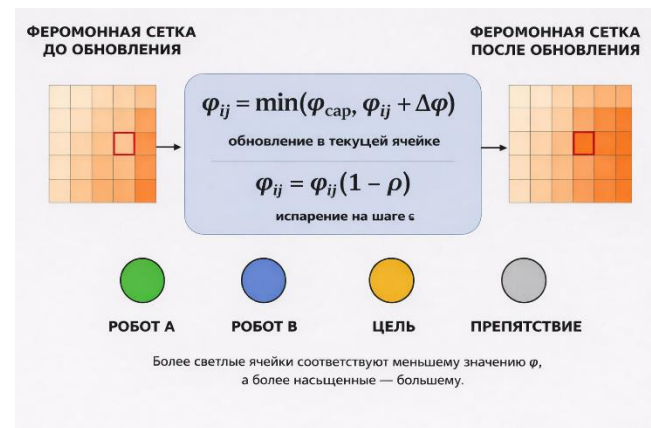


Рис. 2. Концепция метода феромонной сетки с эффектом испарения

### С. Локальная координация на основе модели Voids

Для предотвращения столкновений и согласования движения применяются расширенные правила модели Voids [3, 13]. В этой модели взаимодействие соседних агентов описывается через три базовых тенденции: разделение, выравнивание и сплочение. Под разделением понимается стремление увеличить дистанцию между слишком близкими роботами; под выравниванием – стремление согласовать направления движения; под сплочением – стремление сохранять групповую связанность. Пусть  $\mathbf{p}_1$  и  $\mathbf{p}_2$  – положения двух роботов, а  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{v}_2$  – их скорости. Тогда локальные векторы взаимодействия определяются как:

$$\mathbf{s} = -\frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{\|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1\|^2}, \quad \mathbf{a} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1, \quad (4)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1,$$

где  $\mathbf{s}$  – вектор разделения;  $\mathbf{a}$  – вектор выравнивания;  $\mathbf{c}$  – вектор сплочения. Формула (4) показывает, что при уменьшении расстояния между роботами вклад

разделения резко возрастает, поскольку в знаменателе стоит квадрат нормы расстояния. Это обеспечивает активное взаимное отталкивание на малых дистанциях. Вектор обхода препятствий записывается в виде:

$$\mathbf{a}_{\text{avoid}} = \sum_{m=1}^M \frac{\mathbf{p} - \mathbf{p}_m^o}{\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_m^o\|^2},$$

где  $\mathbf{p}$  – текущее положение робота;  $\mathbf{p}_m^o$  — положение - го препятствия;  $M$  – общее количество обнаруженных препятствий Суммирование по всем препятствиям означает, что итоговое избегание формируется как суперпозиция локальных отталкивающих воздействий. На Рис. 3 надпись «опасная зона» обозначает область сближения роботов, в пределах которой возрастает вклад вектора разделения и требуется активное предотвращение столкновения.

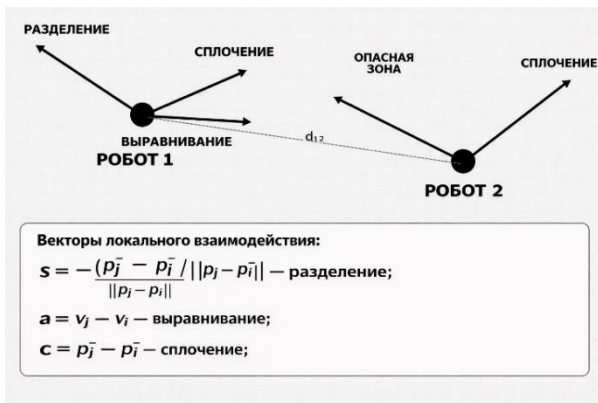


Рис. 3. Геометрическая интерпретация векторов разделения, выравнивания и сплочения для двух роботов при координации по правилам Voids

ТАБЛИЦА I  
СРАВНЕНИЕ БАЗОВОГО РЕЖИМА И ABC-PSO

Метрика	Базовый режим	ABC-PSO	Изменение
Покрываемость области, %	62,3±4,2	78,5±3,1	+26%
Избыточность посещений	0,42±0,08	0,21±0,05	-50%
Найденные цели, %	68±12	89±7	+31%
Остаток энергии, %	42±6	58±5	+38%

$$\mathbf{v}_{\text{fin}} = \mathbf{v}_{\text{glob}} + w_s \mathbf{s} + w_a \mathbf{a} + w_c \mathbf{c} + w_o \mathbf{a}_{\text{avoid}}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{v}_{\text{glob}}$  – глобальная скорость, сформированная модулем ABC-PSO;  $w_s$  – вес вектора разделения;  $w_a$  – вес вектора выравнивания;  $w_c$  – вес вектора сплочения;  $w_o$  – вес вектора обхода препятствий. Таким образом, формула (5) объединяет глобальную цель движения и локальные поправки, отвечающие за безопасное групповое поведение.

В согласованном режиме движения используется схема “ведущий–ведомый”, а также предиктивная проверка пересечения траекторий на несколько шагов вперед. Это уменьшает вероятность конфликтов в условиях ограниченного пространства. Геометрическая интерпретация локальных векторов и их формул приведена на Рис. 3.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На первом этапе сравнивались базовый режим блуждания и гибридный режим ABC-PSO с механизмом памяти. Результаты приведены в Табл. I. В этой таблице столбец «Изменение» показывает относительное отличие гибридного режима от базового режима: положительный знак соответствует росту показателя, а отрицательный — его уменьшению.

Как видно из Табл. I, использование гибридного режима приводит к росту полноты покрытия области и к уменьшению избыточных повторных посещений. Уменьшение избыточности на 50 % означает, что доля лишних повторных заходов в уже исследованные ячейки сократилась вдвое.

Этот эффект связан с работой феромонной памяти и механизма испарения.

На втором этапе для анализа локальной координации рассматривалась пара роботов, работающих в независимом режиме и в согласованном режиме движения. Сводные результаты приведены в Табл. II. Здесь отрицательное значение в столбце «Изменение» является положительным результатом, поскольку оно соответствует уменьшению числа столкновений, длины пути и времени достижения цели.

ТАБЛИЦА II  
СРАВНЕНИЕ НЕЗАВИСИМОГО И СОГЛАСОВАННОГО РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ

Метрика	Независимый режим	Согласованный режим	Изменение
Число столкновений	12,4±3,2	4,1±1,8	-67%
Время достижения цели, шаги	185±22	142±18	-23%
Длина траектории, м	28,5±4,1	22,3±3,2	-22%

Результаты показывают, что согласованный режим движения обеспечивает более плавные траектории и уменьшает число коллизий за счёт применения правил модели Voids и обмена локальной информацией между роботами. Сокращение длины пути и времени достижения цели подтверждает, что теория локальной координации из раздела III действительно работает в программной модели.

На третьем этапе анализировался межстайный обмен между двумя группами роботов, то есть работа режима двух стай с межстайным обменом. Итоги приведены в Табл. III. Здесь столбец «Изменение» показывает эффект от перехода от режима одной стаи к режиму двух стай с межстайным обменом, описанному в разделе III.B.

ТАБЛИЦА III  
СРАВНЕНИЕ РЕЖИМА ОДНОЙ СТАИ И РЕЖИМА ДВУХ СТАЙ С МЕЖСТАЙНЫМ ОБМЕНОМ

Метрика	Одна стая	Две стаи с обменом	Изменение
Покрытие области, %	78,5±3,1	92,3±2,4	+18%
Избыточность посещений	0,21±0,05	0,14±0,04	-33%
Найденные цели, %	89±7	96±4	+8%
Число шагов до завершения	245±28	198±22	-19%

Передача перспективных ячеек между стаями ускоряет обнаружение целей и уменьшает дублирование действий. В экспериментах дополнительно наблюдалась устойчивость алгоритма при наличии до 20 % заблокированных ячеек, а при пропадании связи использовался переход к режиму одной стаи. Пример состояния системы и траекторий роботов в режиме двух стай с межстайным обменом представлен на Рис.4.

### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показывают, что наибольший эффект достигается при совместном использовании трёх уровней организации поведения: глобальной разведки, локальной оптимизации и координации движения. Использование одного только выбора перспективных направлений недостаточно без согласования движения между роботами.

Аналогично, локальная координация без механизмов памяти приводит к росту числа повторных посещений уже обследованных областей.

Механизм памяти с испарением показал свою эффективность как средство снижения избыточности. В отличие от статической памяти, феромонное поле позволяет системе адаптироваться к изменению ситуации в среде и не удерживать слишком долго устаревшую информацию. Межстайный обмен дал дополнительный прирост эффективности, поскольку позволил двум группам роботов избегать дублирования действий и быстрее концентрироваться на перспективных направлениях.

Вместе с тем предложенный подход имеет ограничения. При существенном увеличении числа

роботов возрастает нагрузка на обработку сеток памяти и усложняется координация обмена данными. Кроме того, при переходе к физическим роботам потребуется учёт шумов сенсоров, потерь связи и кинематических ограничений платформ.

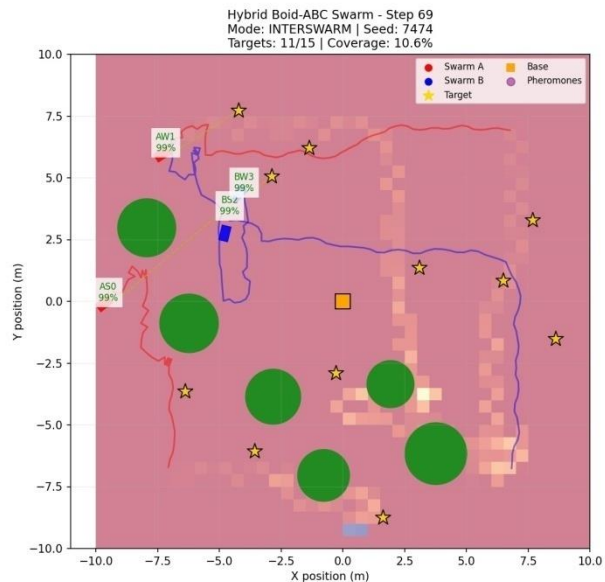


Рис. 4. Пример траекторий роботов и распределения феромонной памяти в режиме двух стай с межстайным обменом

### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан гибридный алгоритм автономного исследования неизвестной среды, который объединяет глобальную разведку методом пчелиной колонии, локальную оптимизацию алгоритмом роя частиц и координацию движения на основе правил Voids.

По сравнению с базовым режимом предложенный алгоритм обеспечивает рост покрытия области на 26 %, уменьшение избыточности повторных посещений на 50 % и увеличение доли найденных целей на 31 %.

Для пары роботов согласованный режим движения уменьшает число столкновений на 67 %, сокращает длину траектории на 22 % и время достижения цели на 23 %.

Межстайный обмен перспективными ячейками даёт дополнительный выигрыш: покрытие увеличивается ещё на 18 %, а число шагов до завершения исследования уменьшается на 19 % по сравнению с режимом одной стаи.

Тем самым отдельное введение и объяснение режимов работы подтверждает связь между теоретической частью статьи и экспериментальными результатами.

Следовательно, предложенный подход представляет интерес для задач распределённого мониторинга, поиска и исследования труднодоступных территорий,

где требуется согласованная работа нескольких мобильных роботов в заранее неизвестной среде.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Technical report-tr06. Erciyes University, 2005. – P. 1–10.
- [2] Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948. – DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [3] Reynolds C.W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21. – No. 4. – P. 25–34. – DOI: 10.1145/37402.37406.
- [4] Masehian E., Royan M. Multi-objective PSO and ABC-based algorithms for path planning in unknown environments // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2019. – Vol. 94. – P. 1–25. – DOI: 10.1007/s10846-018-0893-5.
- [5] Zhang Q. et al. Hybrid artificial bee colony algorithm for parameter estimation of models with unknown but bounded noise // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2020. – Vol. 50, – No. 11. – P. 4261–4273. – DOI: 10.1109/TSMC.2019.2953485.
- [6] Yang Q. et al. Decentralized cooperative exploration based on inter-swarm communication // Robotics and Autonomous Systems. – 2021. – Vol. 137. – DOI: 10.1016/j.robot.2020.103712.
- [7] Diane S.A.K., Lesiv E.A., Pesheva I.A., Neschetnaya A.Y. Multi-Aspect Environment Mapping with a Group of Mobile Robots // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia, – 2019. – P. 478–482.
- [8] Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization. Cambridge: MIT Press. – 2004. – 305 p.
- [9] Hecker J.P., Letizia A., Porter D.M., Pratt S.C. Optimizing the pheromone field in a swarm robotic exploration // Proceedings of ANTS 2020. – Mykonos. – 2020. – P. 123–135.
- [10] Ferrante E. et al. Information transfer in swarms with limited memory // Proceedings of ANTS 2012. – Brussels. – 2012. – P. 1–12.
- [11] Sperati A., Stendardo M., Tuci E. Robot swarms with limited memory and communication: Collective search with a continuous pheromone field // Frontiers in Robotics and AI. – 2022. – Vol. 9. – DOI: 10.3389/frobt.2022.836691.
- [12] Bach Hoai Nguyen, Bing Xue, Mengjie Zhang. A survey on swarm intelligence approaches to feature selection in data mining, Swarm and Evolutionary Computation. – Vol. 54. – 2020. – 100663. – ISSN 2210-6502. – DOI: 10.1016/j.swevo.2020.100663.
- [13] Turgut A.E. et al. Self-organized flocking with a mobile robot swarm // Proceedings of IEEE/RSJ IROS 2008. – Nice. – 2008. – P. 173–178. – DOI: 10.1109/IROS.2008.4650913.

## Информация об авторах

Цвийович Анастасия, магистрант, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, e-mail: [anastasija.cvijovic29@yandex.ru](mailto:anastasija.cvijovic29@yandex.ru)

Быковцев Юрий Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры проблем управления, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, e-mail: [bykovcev@mirea.ru](mailto:bykovcev@mirea.ru)

Манько Сергей Викторович, д.т.н., профессор кафедры проблем управления, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, e-mail: [manko@mirea.ru](mailto:manko@mirea.ru)

## Hybrid Algorithm for Exploration of Unknown Environments by Mobile Robots Based on ABC, PSO and Boids with Memory and Inter-Swarm Exchange

Anastasija Cvijovic, Yuriy Bykovtsev, Sergey Manko

*RTU MIREA, Moscow, Russia*

**Abstract – The paper addresses autonomous exploration of an unknown environment by a group of mobile robots operating under obstacles, limited communication without a priori map. A hybrid algorithm is proposed that combines Artificial Bee Colony, Particle Swarm Optimization, Boids-based local coordination, pheromone memory, and inter-swarm exchange of promising regions. Numerical experiments show that the proposed approach improves area coverage, reduces repeated visits, decreases the number of collisions, and accelerates target reaching in comparison with baseline motion modes. The obtained results are relevant for further development of distributed monitoring systems, search-and-rescue robotic teams, and groups of mobile robots operating in previously unknown environments.**

**Keywords – swarm robotics, autonomous exploration, pheromone memory, particle swarm, local coordination.**

## REFERENCES

- [1] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Technical report-tr06. Erciyes University. – 2005. – P. 1–10.
- [2] Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948. – DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [3] Reynolds C.W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21. – No. 4. – P. 25–34. – DOI: 10.1145/37402.37406.
- [4] Masehian E., Royan M. Multi-objective PSO and ABC-based algorithms for path planning in unknown environments // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2019. – Vol. 94. – P. 1–25. – DOI: 10.1007/s10846-018-0893-5.
- [5] Zhang Q. et al. Hybrid artificial bee colony algorithm for parameter estimation of models with unknown but bounded noise // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2020. – Vol. 50, – No. 11. – P. 4261–4273. – DOI: 10.1109/TSMC.2019.2953485.
- [6] Yang Q. et al. Decentralized cooperative exploration based on inter-swarm communication // Robotics and Autonomous Systems. – 2021. – Vol. 137. – DOI: 10.1016/j.robot.2020.103712.
- [7] Diane S.A.K., Lesiv E.A., Pesheva I.A., Neschetnaya A.Y. Multi-Aspect Environment Mapping with a Group of Mobile Robots // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia, – 2019. – P. 478–482.
- [8] Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization. Cambridge: MIT Press, – 2004. – 305 p.
- [9] Hecker J.P., Letizia A., Porter D.M., Pratt S.C. Optimizing the pheromone field in a swarm robotic exploration // Proceedings of ANTS 2020. – Mykonos, – 2020. – P. 123–135.
- [10] Ferrante E. et al. Information transfer in swarms with limited memory // Proceedings of ANTS 2012. – Brussels, – 2012. – P. 1–12.
- [11] Sperati A., Stendardo M., Tuci E. Robot swarms with limited memory and communication: Collective search with a continuous pheromone field // Frontiers in Robotics and AI. – 2022. – Vol. 9. – DOI: 10.3389/frobt.2022.836691.

- [12] Bach Hoai Nguyen, Bing Xue, Mengjie Zhang. A survey on swarm intelligence approaches to feature selection in data mining, *Swarm and Evolutionary Computation*, – Vol. 54. – 2020. – 100663. – ISSN 2210-6502. – DOI: 10.1016/j.swevo.2020.100663.
- [13] Turgut A. E. et al. Self-organized flocking with a mobile robot swarm // *Proceedings of IEEE/RSJ IROS 2008*. – Nice, –2008. – P. 173–178. – DOI: 10.1109/IROS.2008.4650913.

#### **Information about the authors**

Anastasija Cvijovic, master's student, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, e-mail: [anastasija.cvijovic29@yandex.ru](mailto:anastasija.cvijovic29@yandex.ru)

Yuriy A. Bykovtsev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Control Problems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, e-mail: [bykovcev@mirea.ru](mailto:bykovcev@mirea.ru)

Sergey V. Manko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Control Problems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, e-mail: [manko@mirea.ru](mailto:manko@mirea.ru)

# Нейросетевая система технического зрения для детектирования и трекинга канцелярских товаров

А. Место<sup>1</sup>, Х. Чан<sup>1</sup>, С.А.К. Диане<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

**Аннотация** – Информационная поддержка решений по управлению автономными манипуляционными роботами, устанавливаемыми на конвейерных линиях в целях сортировки транспортируемых объектов, требует применения современных средств анализа изображений. В статье предложен подход к подготовке обучающего множества и настройке сверточной нейронной сети YOLOv8n для детектирования и нейронной сети SORT/DeepSORT для трекинга канцелярских товаров. Исследована обобщающая способность и устойчивость разработанной системы технического зрения к зашумлению изображения. Предлагается схема внедрения нейросетевой модели в контур системы управления автономным манипуляционным роботом.

**Ключевые слова** – система технического зрения, сверточная нейронная сеть, автономный манипуляционный робот, детектирование объектов, визуальный трекинг, YOLOv8, SORT, DeepSORT.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной промышленной автоматизации системы технического зрения являются неотъемлемой частью роботизированных производственных линий, в которых визуальная информация используется для управления технологическими процессами, контроля качества и координации действий промышленных манипуляторов [1].

Одним из распространённых сценариев применения таких систем является задача обнаружения, локализации и сопровождения объектов, перемещающихся по конвейерной ленте.

Для подобных приложений ключевыми требованиями являются высокая точность обнаружения и минимальное время обработки данных. Алгоритм должен функционировать в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, поскольку на промышленных объектах зачастую используются системы управления, основанные на центральных процессорах без специализированных графических ускорителей.

В рамках настоящей работы в качестве объектов наблюдения рассматриваются канцелярские товары (ластики и тюбики клея), расположенные на рабочей поверхности, имитирующей конвейер. Это позволяет воспроизвести реальные условия промышленной сортировки и апробировать разработанные алгоритмы детектирования и трекинга в квази-производственной обстановке. На Рис. 1 показана система “робот Дельта” типичная для операций взятия и установки на конвейерных линиях.

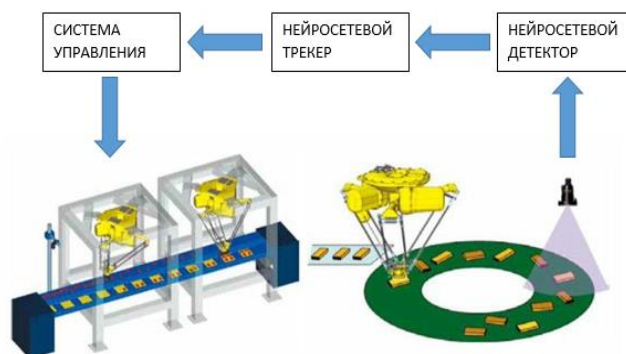


Рис. 1. Схема внедрения нейросетевой модели в контур системы управления автономным манипуляционным роботом

## 1. ПОДГОТОВКА ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

Качество обучающей выборки является определяющим фактором эффективности нейросетевого детектора [2]. В рамках данной работы авторы сформировали обучающие данные для двух взаимодополняющих компонентов системы.

### А. Данные для детектора

Исходные изображения получены RGB-камерой в условиях, приближенных к производственным: различные фоновые поверхности (конвейерная лента, рабочий стол), вариации освещения, частичные перекрытия объектов. Разрешение – 1664×1664

пикселя. Определены два класса: Класс 0 – Цилиндр, Класс 1 – Треугольник.

Аннотирование выполнялось вручную в программе LabelImg в формате YOLO (class\_id, center\_x, center\_y, width, height – нормализованные координаты) [3]. Всего размечено 213 изображений, 1270 объектов. Пример разметки показан на Рис. 2.



Рис. 2. Пример разметки изображений в программе LabelImg

Статистическая информация об обучающей выборке представлена на Рис. 3.

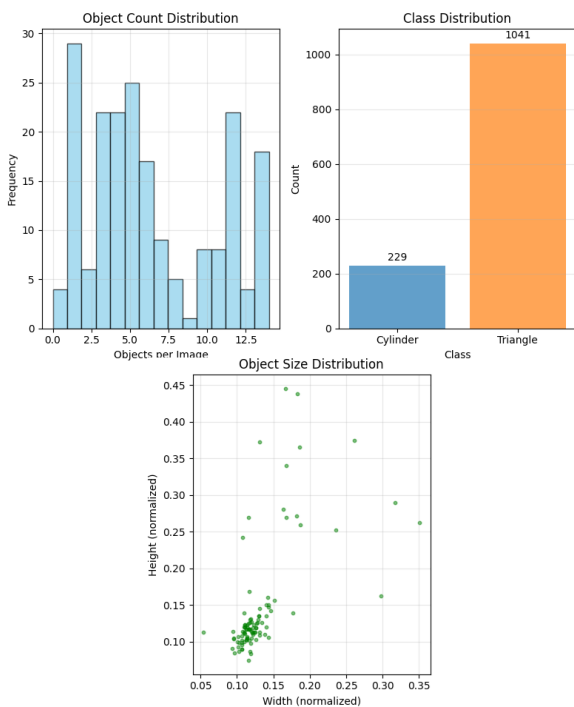


Рис. 3. Распределение количества объектов, классов и размеров в обучающей выборке

### Б. Данные для трекара

Для обучения компонента ReID формировался набор данных из видеопоследовательностей: объекты вручную обрезались по ограничивающим прямоугольникам и организовывались в иерархическую структуру ReID (train/[id]/[frame].jpg). Аннотирование YOLO-данных выполнялось в Label Studio. Дополнительно подготовлены видео-

последовательности с тремя сценариями: без перекрытий, с частичными перекрытиями, с кратковременным полным перекрытием.

### В. Сравнительный анализ методологий

Табл. I представляет сравнение методологий подготовки данных двух компонентов системы технического зрения – детектора и трекара.

ТАБЛИЦА I  
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИЙ ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

Параметр	Детектор	Трекер/ReID
Инструмент разметки	LabelImg	Label Studio; ручная нарезка кадров
Формат аннотаций	YOLO (.txt)	Папочная структура ReID
Кол-во изображений	213 (1270 объектов)	Видеопоследовательности
Классы	Цилиндр, Треугольник	Ластик, Клей
Аугментация	Mosaic, HSV, Flip, Scale	Аугментация при обучении
Разрешение	1664×1664 пкс	640×640 пкс (входное)

## II. ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ДЕТЕКТОРА

В качестве архитектуры нейросетевого детектора объектов выбрана модель YOLOv8n – наиболее лёгкая версия семейства YOLOv8. Выбор обусловлен необходимостью работы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и возможностью инференса на CPU [4]. Сравнение архитектур приведено в Табл. II.

ТАБЛИЦА II  
СРАВНЕНИЕ АРХИТЕКТУР НЕЙРОСЕТЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Метод	Тип	Скорость	Точность	CPU
Faster R-CNN	2-stage	Низкая	Высокая	Нет
SSD	1-stage	Высокая	Средняя	Частично
YOLOv8n (выбран)	1-stage	Очень высокая	Высокая	Да (OpenVINO)
YOLOv9s	1-stage	Высокая	Высокая	Частично

Обучение YOLO осуществляется путём минимизации составной функции потерь, включающей несколько компонентов:

$$L = \lambda_{box} \cdot L_{box} + \lambda_{obj} \cdot L_{obj} + \lambda_{cls} \cdot L_{cls}, \quad (1)$$

где  $L$  – функции потерь;  $L_{box}$  – ошибка локализации (например, на основе IoU);  $L_{obj}$  – ошибка предсказания наличия объекта;  $L_{cls}$  – ошибка классификации;  $\lambda_{box}$  – коэффициент взвешивания для ошибки локализации;  $\lambda_{obj}$  – коэффициент взвешивания для ошибки предсказания наличия объекта;  $\lambda_{cls}$  – коэффициенты для ошибки классификации.

Обучение нейронной сети осуществлялось в среде Google Colab с GPU. Использовались библиотека Ultralytics YOLOv8, фреймворк PyTorch, инструмент OpenVINO Toolkit для оптимизации инференса на CPU. После завершения модель экспортировалась в формат OpenVINO IR [5]. Графики обучения модели приведены на Рис. 4.

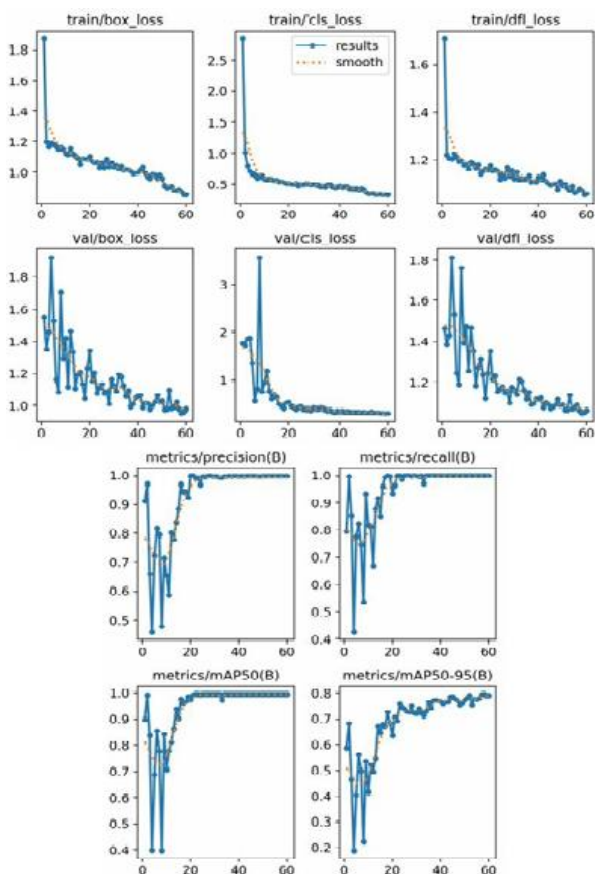


Рис. 4. Графики обучения нейросетевой модели

При обучении нейронной сети YOLO (включая YOLOv8) для оценки качества локализации

использовались метрики, основанные на IoU (Intersection over Union):

$$IoU = \frac{Area(B_{pred} \cap B_{gt})}{Area(B_{pred} \cup B_{gt})} \quad (2)$$

где  $B_{pred}$  – предсказанный ограничивающий прямоугольник;  $B_{gt}$  – истинный ограничивающий прямоугольник.

Кривые обучения демонстрируют хорошую сходимость: функция потерь стабильно убывает и выходит на плато к 120-й эпохе; mAP@0.5 достиг 0.997 (99.7%); признаков переобучения не наблюдается. Параметры конфигурации приведены в Табл. III.

ТАБЛИЦА III  
ПАРАМЕТРЫ КОНФИГУРАЦИИ ОБУЧЕНИЯ ДЕТЕКТОРА

Параметр	Значение	Обоснование
Архитектура	YOLOv8n	Лёгкая модель под CPU
Размер входа	1024×1024 пкс (обучение); 640×640 пкс (инференс)	Обучение при высоком разрешении; оптимизированный инференс на CPU
Число эпох	120	Достаточная сходимость
Размер батча	8	Google Colab (GPU, AdamW)
Предоб. веса	yolov8n.pt	Transfer Learning (COCO)
Формат экспорта	OpenVINO IR	CPU-инференс
Порог уверенности (класс 0)	0,15	Повышение полноты цилиндров
Порог уверенности (класс 1)	0,30	Снижение ложных срабатываний
Порог NMS (IoU)	0,60	Подавление дублей bbox

### III. НАСТРОЙКА АЛГОРИТМА ТРЕКИНГА

#### A. Выбор метода трекинга

Задача визуального трекинга требует сохранения идентичности каждого объекта на протяжении всего видеопотока. Анализ методов (см. Табл. IV) показал, что оптимальным решением является подход tracking-by-detection на основе SORT и DeepSORT [6]. Блок-схема разработанной системы обнаружения и многообъектного трекинга представлена на Рис. 5.

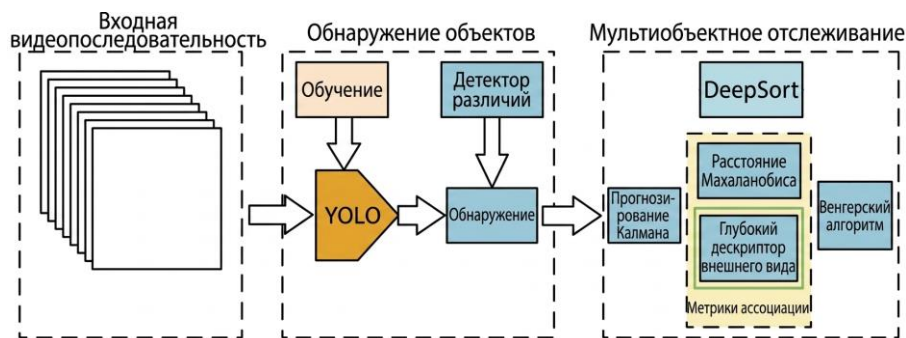


Рис. 5. Блок-схема системы обнаружения и многообъектного трекинга

ТАБЛИЦА IV  
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОГО ТРЕКИНГА

Метод	Ключевая идея	Преимущества	Недостатки
KCF	Корреляция HOG	Высокая скорость	1 объект
Opt. Flow	Точки потока	Движение поверхности	Однотонные объекты
SORT (выбран)	Kalman+Hungarian	Скорость, мульти-объект	Зависит от детектора
DeepSORT (выбран)	SORT+Appearance	Устойчивость к перекрытиям	Медленнее SORT
Siamese	CNN-шаблоны	Высокая точность	Вычислительно затратен

### Б. Алгоритм SORT и фильтр Калмана

SORT (Simple Online and Realtime Tracking) объединяет фильтр Калмана для предсказания положения объектов между кадрами и алгоритм Венгера для оптимального сопоставления детекций с треками [7]. Вектор состояния объекта:

$$x = [u, v, s, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{s}]^T, \quad (3)$$

где  $u, v$  – координаты центра объекта;  $s$  – площадь;  $r$  – соотношение сторон bbox;  $\dot{u}, \dot{v}, \dot{s}$  – скорости изменения соответствующих параметров;  $T$  – операция транспонирования.

Этап прогноза:

$$\hat{x}_{t/t-1} = F\hat{x}_{t-1/t-1}, \quad (4)$$

$$P_{t/t-1} = FP_{t-1/t-1}F^T + Q, \quad (5)$$

где  $F$  – матрица перехода состояния, описывающая динамику движения (например, модель

прямолинейного движения с постоянной скоростью);  $P$  – матрица ковариации;  $Q$  – ковариационная матрица шума процесса;  $T$  – символ транспонирования;  $\wedge$  – символ оценивания значения,  $t_1/t_2$  – индекс атрибуции к моменту времени  $t_1$  на шаге времени  $t_2$ . Этот шаг позволяет предсказать, где объект должен находиться на следующем кадре, даже если наблюдений нет.

Этап обновления:

$$K_t = P_{t/t-1}H^T(HP_{t-1/t-1}H^T + R)^{-1}, \quad (6)$$

$$\hat{x}_{t/t} = \hat{x}_{t/t-1} + K_t(z_t - H\hat{x}_{t/t-1}), \quad (7)$$

$$P_{t/t} = (I - K_tH)P_{t/t-1}, \quad (8)$$

где  $K_t$  – матрица Калмана, определяющая, насколько скорректировать прогноз с учётом новых измерений;  $H$  – матрица наблюдения, связывающая измерения детектора с состоянием объекта;  $R$  – ковариационная матрица шума измерений;  $z_t$  – измерения детектора (координаты центра, площадь, соотношение сторон);  $I$  – единичная матрица;  $T$  – символ транспонирования.

Метрика сопоставления треков и детекций:  $1 - IoU$ , минимизируемая алгоритмом Венгера за время  $O(n^3)$ .

### В. Алгоритм DeepSORT и компонент ReID

DeepSORT дополняет SORT appearance-признаками (embedding-вектор  $d=128$ ), извлекаемыми нейросетью ReID на основе MobileNetV2 [8, 9]. Комбинированная метрика:

$$C = \lambda \cdot d_{motion} + (1 - \lambda) \cdot d_{appearance}, \quad (9)$$

где  $C$  – комбинированная метрика, учитывающая расстояние по движению и внешнему виду;  $\lambda$  – коэффициент весомости, регулирующий вклад каждого компонента;  $d_{motion}$  – расстояние Махаланобиса;  $d_{appearance}$  – косинусное расстояние.

Это снижает число ошибок идентификации (ID-switch) при перекрытиях объектов.

### Г. Параметрическая оптимизация

Эффективность алгоритмов SORT и DeepSORT в значительной степени определяется корректным выбором их параметров. В ходе экспериментальных исследований была проведена параметрическая оптимизация с целью обеспечения баланса между стабильностью треков, устойчивостью к перекрытиям и вычислительной эффективностью системы. Оптимизированные значения параметров приведены в Табл. V.

ТАБЛИЦА V  
ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ SORT / DEEPSORT

Параметр	Значение	Пояснение
iou_threshold	0,3	Порог IoU для сопоставления треков
max_age	45 кадров	Число кадров до удаления трека
min_hits	2	Мин. подтверждений нового трека
conf_threshold	0,4	Порог уверенности детектора
R_scale_(s,r)	×10	Шум измерений (площадь/стороны)
P_scale_velocity	×1000	Неопределённость скорости при старте
Q_scale_velocity	×0,01	Сглаживание траектории

## IV. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ

### А. Точность нейросетевого детектора

Оценка нейросетевого детектора YOLOv8n проводилась при CPU-инференсе с оптимизацией OpenVINO. Результаты по классам приведены в Табл. VI.

ТАБЛИЦА VI  
РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ YOLOV8N ПО КЛАССАМ

Класс	TP	FP	FN	Recall	Precision
Цилиндр (0)	229	5	0	1,000	0,980
Треугольник (1)	1041	12	0	1,000	0,989

Получена стопроцентная полнота обнаружения для обоих классов. Пространственная точность: Mean IoU = 0,960, AP@0,5 (Цилиндр) = 0,996, AP@0,5 (Треугольник) = 0,999, mAP@0,5 = 0,997. Среднее

время CPU-инференса – 485,75 мс/изображение (2,06 FPS). Полная задержка принятия решения – 795,72 мс. Пример обнаружения при размытии и изменённом фоне показан на Рис. 6.

### Б. Оценка алгоритмов трекинга

Тестирование проводилось на персональном компьютере с поддержкой GPU (CUDA), с использованием Python, PyTorch, OpenCV и детектора YOLOv9s (mAP@0,5 = 0,99). Анализируются три сценария наблюдения объектов: без перекрытий, частичное перекрытие, полное кратковременное перекрытие. Результаты работы алгоритма SORT показаны на Рис. 7, результаты DeepSORT – на Рис. 8. Дополнительная информация о сравнении алгоритмов приведена в Табл. VII.

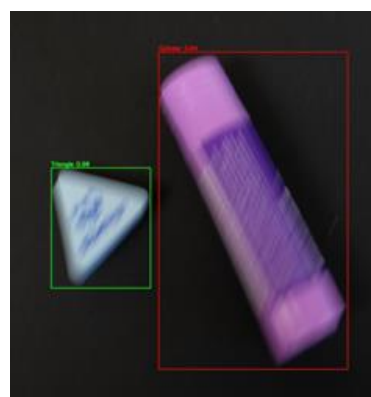


Рис. 6. Результаты обнаружения на обучающих данных с учётом размытия

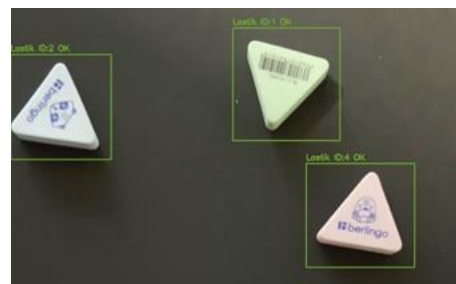


Рис. 7. Результаты работы алгоритма SORT



Рис. 8. Результаты работы алгоритма DeepSORT

ТАБЛИЦА VII  
СРАВНЕНИЕ SORT И DEEPSORT

Критерий	SORT	DeepSORT
Скорость (FPS)	~13–15 FPS	~5–6 FPS
Точность (без перекрытий)	Высокая	Высокая
Устойчивость при перекрытиях	Хорошая	Очень высокая
Восстановление ID	Удовл.	Высокое
ID-switch	Встречаются	Значительно меньше
Вычислительная нагрузка	Низкая	Высокая (ReID)

### В. Устойчивость к шумлению

Качественная оценка показала: модель стабильно работает при коэффициентах достоверности детекции 0,68–0,98. При наличии геометрически схожих элементов фона наблюдались единичные ложные срабатывания, устранимые расширением обучающей выборки. Алгоритм корректно работает при частичных перекрытиях, что подтверждает применимость в условиях высокой плотности объектов на конвейере.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана комплексная нейросетевая система технического зрения для детектирования и трекинга канцелярских товаров на конвейерной линии, объединяющая результаты двух независимых исследований. Первый автор разработал нейросетевой детектор на базе YOLOv8n с оптимизацией для CPU через OpenVINO; второй – алгоритмы визуального трекинга SORT и DeepSORT с обученным компонентом ReID на основе MobileNetV2.

Оба подхода решают принципиально разные, но взаимозависимые задачи и образуют единый замкнутый контур. Детектор отвечает за пространственную локализацию объектов на каждом отдельном кадре: обученная на 213 изображениях модель YOLOv8n достигла стопроцентной полноты обнаружения при  $mAP@0,5 = 0,997$  и времени инференса менее 0,5 с на изображение при работе только на CPU. Трекер принимает эти покадровые детекции как входные данные и решает задачу сохранения идентичности объектов во времени: алгоритм SORT с фильтром Калмана и ассоциацией по IoU обеспечивает непрерывность траекторий при частичных и кратковременных полных перекрытиях, а обученная модель ReID в составе DeepSORT дополнительно снижает число ошибок смены идентификаторов (ID-switch) при сложных сценах.

Взаимодополняемость двух подходов проявляется на трёх уровнях. На уровне точности: детектор устраняет неопределённость положения объекта в каждом кадре, а трекер устраняет неопределённость принадлежности – он решает, какому из ранее известных объектов соответствует новая детекция. Без детектора трекер не имеет измерений для обновления фильтра Калмана; без трекара детектор выдаёт изолированные, несвязанные между кадрами ограничивающие рамки, непригодные для управления манипулятором. На уровне вычислительных ресурсов: детектор работает на CPU (2,06 FPS при инференсе через OpenVINO), что достаточно для конвейерных систем с нежёсткими требованиями к частоте кадров, тогда как SORT добавляет минимальные накладные расходы и обеспечивает трекинг в реальном времени ( $\geq 25$  FPS); DeepSORT с ReID подключается при необходимости повышенной устойчивости идентификации, принося ограничение по скорости (~5–6 FPS), что приемлемо при наличии GPU. На уровне интеграции: выходные координаты (u, v) детектированных и отслеживаемых объектов могут быть переданы в алгоритм предиктивного управления (MPC) промышленного манипулятора после преобразования в систему координат рабочего пространства посредством матрицы проекции  $T = K \cdot [R|t]$  откалиброванной камеры (конфигурация eye-in-hand), формируя замкнутый контур «зрение–управление».

Таким образом, вклад первого автора – высокоточный, оптимизированный под CPU детектор – является необходимым фундаментом, на котором работает вклад второго автора: устойчивый по времени трекер, способный сохранять идентичность объектов в условиях перекрытий и использовать траектории для управления захватным устройством. Ни один из компонентов не достигает целевой функциональности системы в отдельности; именно их совместное применение обеспечивает полный цикл обработки от сырого видеокadra до управляющего сигнала манипулятора. Вклад третьего автора – выбор методологической основы и общее руководство ходом нучной работы.

Дальнейшие исследования целесообразно направить: на расширение обучающей выборки для повышения устойчивости к вариациям фона; оптимизацию компонента ReID для работы на CPU с целью объединения точности DeepSORT и скорости SORT; верификацию интегрированной системы на реальном роботизированном комплексе с конвейерным транспортированием объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing, 2012. – 1104 с.
- [2] Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – Springer, 2022. – 935 p.
- [3] Tzutalin. LabelImg. URL: <https://github.com/tzutalin/labelImg>

- [4] Ultralytics. YOLOv8 Documentation. URL: <https://docs.ultralytics.com>.
- [5] Intel Corp. OpenVINO™ Toolkit. URL: <https://docs.openvino.ai>.
- [6] Bewley A. et al. Simple Online and Realtime Tracking // IEEE ICIP. – 2016. – P. 3464–3468.
- [7] FilterPy. Kalman Filters in Python. URL: <https://filterpy.readthedocs.io>.
- [8] Wojke N. et al. DeepSORT // IEEE ICIP. – 2017. – P. 3645–3649.
- [9] Sandler M. et al. MobileNetV2 // CVPR. – 2018. – P. 4510–4520.

### Информация об авторах

Место Аммар – студент группы КРМО-11-24, Институт искусственного интеллекта, РТУ МИРЭА, Москва, Россия, mesto.ammarr@mail.ru

Чан Минь Хоанг – студент группы КРМО-11-24, Институт искусственного интеллекта, РТУ МИРЭА, Москва, Россия, mh69titanic@gmail.com

Диане Секу Абдель Кадер – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаб. №90 ИПУ РАН, доцент кафедры проблем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422.

### Information about the authors

Ammar Mesto is a student of the KRMO-11-24 group, Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia, mesto.ammarr@mail.ru

Minh Hoang Tran is a student of the KRMO-11-24 group, Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia, mh69titanic@gmail.com

Sekou Abdel Kader Diane is Cand. of Tech. Sciences, Senior Researcher at the lab. No. 90 ICS RAS, Associate Professor of the Department of Problems of RTU MIREA, Moscow, Russia, diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422.

### A neural network vision system for detecting and tracking office supplies

Ammar Mesto<sup>1</sup>, Minh Hoang Tran<sup>1</sup>, Sekou Diane<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia

**Abstract** – Information support for solutions for control of autonomous manipulation robots installed on conveyor lines in order to sort transported objects requires the use of modern image analysis tools. The article proposes an approach to preparing a training set and configuring the YOLOv8n convolutional neural network for detection and the SORT/DeepSORT neural network for tracking office supplies. The generalizing ability and stability of the developed vision system to image noise are investigated. A scheme for the implementation of a neural network model in the contour of an autonomous manipulative robot control system is proposed.

**Keywords** – vision system, convolutional neural network, autonomous manipulation robot, object detection, visual tracking, YOLOv8, SORT, DeepSORT.

### REFERENCES

- [1] Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing, 2012. – 1104 с.
- [2] Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – Springer, 2022. –935 p.
- [3] Tzatalin. LabelImg. URL: <https://github.com/tzatalin/labelImg>.
- [4] Ultralytics. YOLOv8 Documentation. URL: <https://docs.ultralytics.com>.
- [5] Intel Corp. OpenVINO™ Toolkit. URL: <https://docs.openvino.ai>.
- [6] Bewley A. et al. Simple Online and Realtime Tracking // IEEE ICIP. – 2016. – P. 3464–3468.

# Совершенствование технологии калибровки средств измерения электрических величин на базе модульных приборов в системе Интернета измерений (IoM)

О.В. Стукач<sup>1,2</sup>, И.А. Ершов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Аннотация** – Рост количества программируемых средств измерений и спроса на метрологические услуги приводит к развитию концепции дистанционной калибровки, позволяющей значительно сократить финансовые, логистические затраты и рабочее время сотрудника калибровочной лаборатории, повысить эффективность работы метрологических служб и в конечном итоге значительно усовершенствовать систему передачи физических величин. Для обеспечения выполнения графика калибровки оборудования внедрение системы дистанционной калибровки актуально для крупных предприятий с территориально распределёнными филиалами. Основная особенность дистанционной калибровки заключается в автоматизации процесса и управлении средствами измерений по сети. Дано описание программно-аппаратного комплекса дистанционной калибровки через Ethernet на базе шасси для модульных приборов PXI в среде LabVIEW компании National Instruments. Простота интерфейса программного управления различными средствами измерений позволяет использовать разработанную систему с другими средствами измерений без значительных изменений в программах. Описаны ключевые особенности процедуры дистанционной калибровки программируемых вольтметров. Результаты использованы для разработки методики дистанционной калибровки программируемых вольтметров. На основе действующих законов и нормативных документов приведены рекомендации для практического использования предложенной системы.

**Ключевые слова** – средство измерений, поверка, программно-аппаратный комплекс, методика калибровки, интеллектуальная информационно-измерительная система, дистанционная калибровка, законодательная метрология, нормативная база, электрические величины, интеллектуальный датчик, Интернет измерений, Internet of Measurement, IoM, LabVIEW, измерение, измерительная процедура, метрологическая прослеживаемость, мера метрологической достоверности, неопределённость измерений, Аршин, транспортирование эталона, цифровой двойник, метрология 4.0, метрологическое облако, цифровая метрология, цифровизация.

## ВВЕДЕНИЕ

Закон «Об обеспечении единства измерений» обязывает изготовителей средств измерений (СИ) обеспечивать их периодическую поверку [1]. На сегодняшний день ежегодно поверяется несколько миллионов СИ, что приводит к их отрыву от производства на длительное время, большим денежным и временным затратам. Поверка у заказчика возможна не для всех видов СИ и связана с транспортировкой эталонов. Для экономии средств изготовители обосновывают непричастность СИ к сфере государственного обеспечения единства измерений или напрямую нарушают закон, хотя в условиях конкуренции изготовители заинтересованы в повышении качества, что напрямую зависит от достоверных показаний СИ. Несмотря на активное развитие информационных систем, повсеместно продолжает использоваться ручная поверка приборов и передача данных на бумажном носителе. Это свидетельствует о том, что система обеспечения единства измерений безнадежно устарела. Говорят даже о неоправданной затратности и кризисе всей системы традиционной метрологии [2], о необходимости смены её парадигмы [3], минимизации бюрократических процедур, о разработке новых методов передачи физической величины, в том числе автоматизированных, переходе от периодических процедур к адаптивным без участия человека [4].

Тем не менее, развитие сетевых технологий, распределённых измерительных информационных систем [5], средств автоматизации измерений, промышленного Интернета вещей [6–8] и цифровая трансформация открывают большие возможности в области оптимизации рутинных, однообразных и предельно регламентированных метрологических работ [9]. Использование революционных технологий связи позволяет организовать удалённое сличение метрологических характеристик СИ непосредственно в местах их эксплуатации [10, 11]. Автоматизация

позволяет в значительной степени уменьшить трудозатраты при калибровке и поверке выпускаемой продукции, даёт возможность проводить измерения низкоквалифицированному персоналу предприятия, что в свою очередь уменьшает стоимость выпускаемой продукции.

## I. ДИСТАНЦИОННАЯ КАЛИБРОВКА

Отечественный и зарубежный опыт [12] свидетельствует, что наиболее эффективным и современным решением передачи единиц электрических величин является дистанционная калибровка [13], имеющая давнюю историю [14–16], но не нашедшая пока широкого применения [17]. В её основе лежит использование программируемых СИ, которые позволяют управляться по Интернету в режиме реального времени [18], автоматизировать многие операции, такие как подача эталонных сигналов, проведение многократных измерений, фиксация показаний СИ, обработка полученных результатов, установление пригодности СИ и внесение данных в информационную систему “Аршин” [19] в существующем или расширенном виде [20] или в метрологическое облако [21]. Актуальность дистанционной калибровки возрастает с увеличением количества используемых программируемых СИ [22].

В статье [23] представлен метод проведения дистанционной калибровки СИ через Интернет, рассматриваются вопросы внедрения данного метода в аккредитованных лабораториях. Отмечено, что широкое внедрение дистанционной калибровки зависит от признания результатов этой метрологической услуги и выдвигает новые требования к самим СИ и к методам обработки результатов.

Системы дистанционной калибровки уже внедрены на ряде предприятий для конкретных СИ [24–26]. Но они зачастую предназначены для использования только на определённых предприятиях с целью калибровки конкретных приборов, а адаптация программного обеспечения к другому оборудованию невозможна или является затруднительной и дорогостоящей. Основной целью создания системы калибровки является возможность контроля и надзора за удалёнными эталонами и СИ, которые используются в процессе калибровки в условиях, определённых в соответствии с международным стандартом ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2006 [25]. Эта система состоит из транспортируемого устройства калибровки высокой точности, который управляется персональным компьютером на стороне поставщика услуг (сервера) и приложения на стороне сервера, которое управляет и контролирует весь процесс калибровки.

Дистанционная калибровка может быть реализована при помощи клиент-серверной архитектуры, состоящей из двух различных приложений, соответствующих калибруемому СИ и эталону [26]. При этом калибруемое и эталонное СИ должны быть

расположены в одном месте и подключены к клиентской системе, которая принимает команды от программы-сервера, установленной на оборудовании калибровочной лаборатории, и пересылает их на эти устройства через выбранный интерфейс. Затем она фиксирует показания прибора и передает их на сервер через Интернет. Все операции для подготовки сертификата о калибровке выполняются на стороне сервера.

Клиент-серверная часть является важной частью системы дистанционной калибровки [27]. В статье [28] после демонстрации простой архитектуры клиент-сервер утверждается, что использование мобильных многоагентных технологий решит большинство проблем безопасности, работая так же хорошо и эффективно, как традиционная архитектура клиент-сервер без агентов. Разработаны общий алгоритм функционирования, структурная и функциональная схемы системы. Архитектура построена с применением среды LabVIEW компании National Instruments, описана модель измерения и проведен анализ составляющих общей неопределённости измерений. Для считывания и распознавания показаний приборов предлагается использовать машинное обучение и распознавание образов [29]. Особенно это актуально для объектов энергосистемы, не имеющих подходящего интерфейса для передачи данных и которые не могут возвращать информацию для поправки калибровочной функции.

Для широкого спектра задач дистанционная калибровка требует синхронизации между клиентской и серверной сторонами. В работе [30] продемонстрирован прототип синхронной системы. Требования к синхронизации учтены и в алгоритме адаптивного динамического синхронного планирования. С помощью комплексных имитационных экспериментов подтверждена эффективность предложенного метода и его производительность с точки зрения общего времени выполнения калибровки.

Наиболее популярным приложением рассматриваемой технологии является энергетика [31], в частности, дистанционная калибровка счётчиков электрической энергии на основе облачных технологий и беспроводной связи [32–34]. Разработанная для удовлетворения растущих требований к калибровке счётчиков электроэнергии, самая эффективная и совершенная распределённая система, объединяющая несколько узлов, находится на ранней стадии разработки, но имеет потенциал масштабируемости [35]. В ней решается проблема распределения ресурсов для синхронной калибровки между распределёнными узлами путем внедрения гибридного генетического алгоритма, который оптимизирует планирование и управление ресурсами. Эксперименты показывают, что предложенный алгоритм превосходит другие сопоставимые подходы в распределённых системах калибровки.

Калибровка энергетического оборудования стала важной задачей в современных энергосистемах. В статье [36] предлагается прототип распределённой дистанционной калибровки, основанный на облачной архитектуре, объединяющей интеллектуальные датчики, технологии Интернета вещей и вычислительные технологии. Используется высокоточный модуль преобразования частоты в напряжение, использующий спутниковые сигналы для решения задач отслеживания и передачи измерений, тем самым обеспечивая надёжность и стабильность на протяжении всего процесса. Модуль мониторинга окружающей среды отслеживает температуру, влажность и электромагнитные помехи. В сочетании с системой видеонаблюдения и оптическим распознаванием символов это обеспечивает интеллектуальную сквозную запись и автоматическое извлечение данных во время калибровки. Реализован алгоритм планировки для передачи вычислительных задач в метрологическое облако, что позволяет максимально эффективно использовать ресурсы в рамках совместной работы и повышает качество обслуживания. Прототип расширяет существующие облачные платформы совместной работы, объединяя СИ и датчики в сеть, тем самым повышая интеллектуальность и точность калибровки на нескольких уровнях. Интегрированная облачная система управления обеспечивает стандартизированную обработку данных и безопасную совместную работу нескольких пользователей. Это решение не только повысило интеллектуальность и точность дистанционной калибровки, но и обеспечивает мощную техническую поддержку для обеспечения точности измерений и соответствия эксплуатационным характеристикам.

К другим приложениям в энергетике можно отнести калибровку измерительных трансформаторов в реальных условиях, когда температура в разных географических точках может существенно отличаться [37], релейной защиты и вторичных систем подстанций [38], где устройство для тестирования удалённого терминала, основанное на стандарте IEC 61850, обеспечивает удалённую подачу тестовых сигналов и стандартизированное взаимодействие с данными из нескольких источников.

В настоящее время несколько международных институтов проводят исследования, связанные с дистанционной калибровкой, легко организуемой с использованием компьютерных сетей. Это, например, Национальный институт стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology, NIST), Национальный институт измерений Японии (National Measurement Institute of Japan, NMIJ), Федеральный физико-технологический институт (Federal Institute of Physics and Technology, FIPT), Национальная физическая лаборатория (National Physical Laboratory, NPL) Великобритании и многие другие.

Вопрос обеспечения метрологической прослеживаемости не остаётся без внимания. В работе [39] предложен метод частотно-временной калибровки, в которой в качестве калибратора использовался атомный рубидиевый стандарт частоты. Это позволило лучше решить проблему отслеживания времени на транспорте.

Важной сферой использования дистанционной калибровки является железнодорожный транспорт, где транспортировка эталонов связана с большими затратами [40] и рисками [41]. Иногда транспортировка эталонов вообще не используется, например, при калибровке вагонных весов с использованием весопроверочного вагона [42]. Условия эксплуатации СИ диктуют острую необходимость калибровки на месте без отправки в аккредитованные центры. С программируемыми СИ технические проблемы решаемы наиболее простыми способами. Но даже если средство измерения не является программируемым, как например путевой шаблон, в работе [43] найден изящный выход из положения и предложена система калибровки с наблюдением по видеокамерам. Отмечено, что для того чтобы откалибровать шаблоны так, как это принято сейчас, необходимо иметь подменный фонд, а каждый шаблон стоит примерно 250000 рублей в ценах 2023 года. Необходимо оплачивать командировочные расходы работнику и водителю, использовать автотранспорт, что, например, в условиях Крайнего Севера более чем накладно финансово. Хороший анализ и расчёты по сравнению затрат при классической и дистанционной калибровке выполнен авторами статьи [40]. Внедрение калибровки с удалённым доступом даёт значительную экономию средств, но конечно требуется признание результатов метрологической услуги.

Предлагается система дистанционной калибровки, основанная на глобальной системе позиционирования GPS [44]. Система реализует дистанционную калибровку источника постоянного напряжения и решает проблему дополнительных ошибок на месте калибровки. Значение напряжения на стороне заказчика и стороне калибровочной лаборатории дистанционно сравнивается по измерению отклонения во времени между импульсным сигналом, преобразованным из напряжения, и синхронным тактовым сигналом GPS. Измеряется разность напряжений между двумя сторонами и выполняется дистанционная калибровка источников постоянного напряжения. Расхождение между результатами дистанционной калибровки и традиционного метода находится в допустимых пределах и согласуются в оценке уровня точности.

В последние годы сфера применения дистанционной калибровки постепенно расширяется. Создана полностью автоматизированная система измерения сопротивления в среде LabVIEW, в которой не требуется низкая неопределённость [45]. Предложен

метод дистанционной калибровки ваттметра с хорошей точностью калибровки в случае типичных потерь мощности в сети [46] при условии, что характеристики среды постоянны в течение короткого периода калибровки. В статье [47] предложен метод калибровки серводвигателей для предотвращения выхода их из-под контроля, где с помощью ПЛИС можно быстро организовать обратную связь для управления калибровкой с функциями удалённого мониторинга и управления параметрами. Разработан измеритель коэффициента мощности с использованием Интернета вещей [48] и соответствующая платформа, напоминающая Интернет Измерений (IoM), которая может обеспечить повышение коэффициента мощности, удалённый мониторинг и регистрацию данных [49]. Разработана система калибровки промышленного термометра [50], стандарта давления [51, 52], многоспектральных датчиков, обычно используемых для дистанционного зондирования [53], видеокамер, исправляющих изображения [54, 55], тепловизионной системы [56], прецизионных спектрометров [57], спектральной аппаратуры [58], в том числе для беспилотных летательных аппаратов [59], датчиков качества воздуха [60], температуры и влажности окружающей среды [61] и даже устройств мониторинга теплиц [62].

## II. РЕШЕНИЕ ПО ДИСТАНЦИОННОЙ КАЛИБРОВКЕ

Устройство калибровки должно иметь интерфейс связи (например, USB, LAN или GPIB) для того, чтобы подключить его к компьютеру клиента, управляющего калибровкой. Приложение на стороне поставщика услуг по калибровке выполняет процедуру калибровки без помощи человека на стороне заказчика. Кроме того, оборудование на стороне клиента должно самостоятельно распознавать и производить автоматическую настройку доступных интерфейсов, связывающих СИ и эталоны. Оператор на стороне клиента должен лишь обеспечивать корректную связь между оборудованием, которое проходит процедуру калибровки, и эталонным оборудованием. Следовательно, исчезает необходимость в специализированных инженерах или техниках в лабораториях на предприятии-клиенте.

Во время внешнего осмотра в первую очередь проверяется маркировка, комплектность, отсутствие повреждений, исправность и чистота разъёмов. Калибруемое СИ подготавливается к использованию в соответствии с руководством по эксплуатации. Проводится проверка нормального функционирования прибора. Далее программно-аппаратный комплекс подключается к калибруемому СИ и Интернету через сетевой коммутатор.

В качестве примера рассмотрим схему дистанционной калибровки цифрового вольтметра (Рис. 1). Сотрудник лаборатории при помощи

программного обеспечения на своём персональном компьютере формирует необходимую информацию для генерации сигнала. Эта информация далее поступает на персональный компьютер, подключённый к аппаратному комплексу, в лаборатории заказчика. Генерация сигнала для калибруемого СИ происходит после поступления команды на аппаратный комплекс.

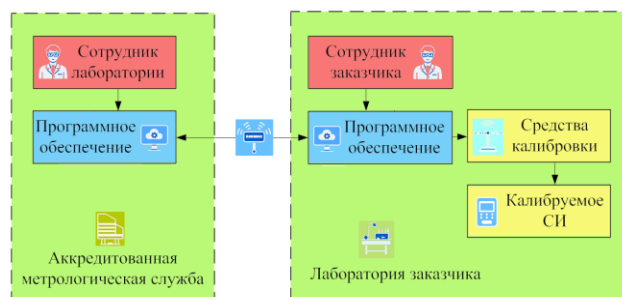


Рис. 1. Схема дистанционной калибровки

Программное обеспечение должно обеспечивать защиту от стороннего вмешательства: у сотрудника заказчика не должно быть возможности управлять средством калибровки. Для подключения программно-аппаратного комплекса к калибруемому СИ и сети требуется сотрудник с базовыми навыками работы с персональным компьютером. Он должен будет запустить программу комплекса и ввести туда IP-адреса компьютера с управляющей программой и калибруемого СИ.

В качестве аппаратного обеспечения был использован программно-аппаратный комплекс PXI компания National Instruments [63] с контроллером NI PXI-8102 и генератором сигналов NI PXI-5421 под управлением программного обеспечения LabVIEW [64]. Вольтметр получает сигнал от генератора, который подключён к контроллеру через шасси.

Управление генерацией эталонного сигнала производится через Ethernet с помощью управляющей программы (Рис. 2). Интерфейс управляющей программы представлен на Рис. 3. Для обеспечения последовательности операций используется структура «Flat Sequence». В первом блоке программа передаёт данные, необходимых для генерации сигнала – форма сигнала, амплитуда и частота до момента их получения. Во втором блоке программа ожидает формирования массива результатов измерений с PXI, который записывается в файл. Дистанционный контроль условий окружающей среды осуществляется с помощью термогигрометров с цифровым выходом и возможностью подключения к контроллеру: в третьем блоке программа записывает результаты измерений с подключённого к PXI датчика температуры и влажности HS-2000D для дистанционного контроля условий проведения калибровки. Программа в среде LabVIEW совместима с продуктами других изготовителей.

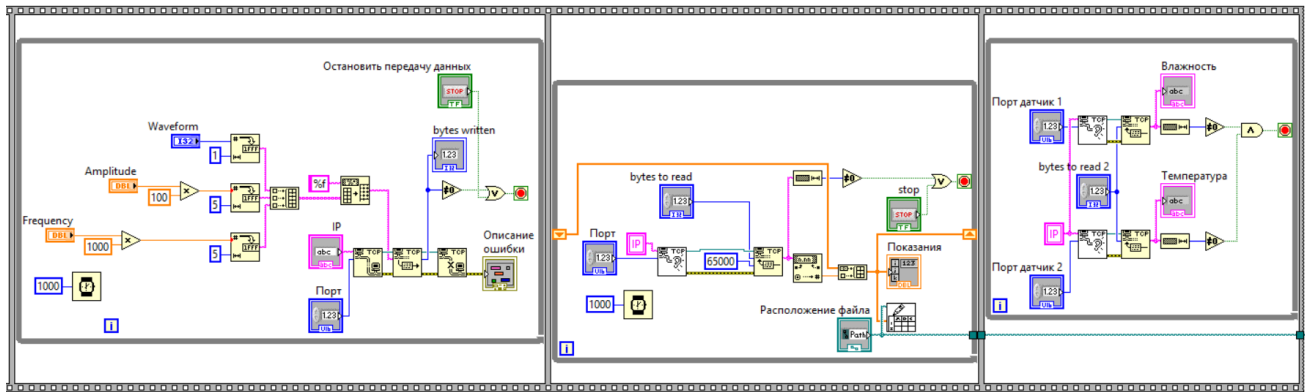


Рис. 2. Управляющая программа

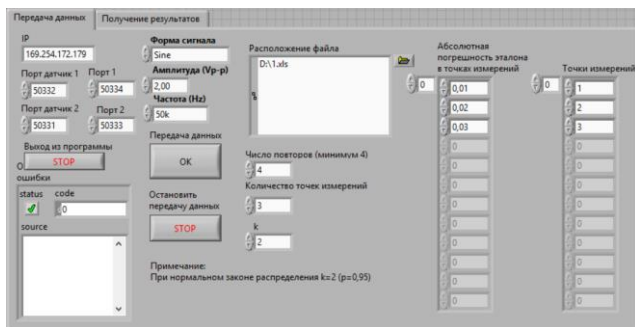


Рис. 3. Интерфейс управляющей программы

Пользователь вводит необходимые параметры генерируемого сигнала, IP-адрес аппаратной системы и порт TCP, затем кнопкой «Передача данных» запускает отправку данных. К этому моменту в лаборатории заказчика уже должны быть проведены все подготовительные операции: калибруемый СИ подключён к системе, соответствующая программа запущена, и сотрудник готов к работе. Сигнал поступает на калибруемое СИ, после чего сотрудник считывает показания, останавливает генерацию сигнала и отправляет показания сотруднику аккредитованной лаборатории. Поскольку программа дистанционной калибровки должна обеспечить невозможность изменения генерируемого сигнала сотрудником заказчика, во время процедуры калибровки сотрудник лаборатории имеет возможность только остановить генерацию сигнала.

Программа имеет простой интерфейс и ограниченный функционал. Это сделано с целью исключения возможности повлиять на процесс калибровки, поскольку управление процессом должно производиться исключительно управляющей программой. Сотруднику необходимо только выбрать используемые устройства.

На Рис. 4 представлен интерфейс программы. Все подключённые устройства PXI определяет автоматически. Чтобы управление генератором производил только сотрудник аккредитованной организации с компьютера, подключённого по Ethernet, функционал ограничен отправкой полученных

результатов измерений и остановкой генерации сигнала. В процессе калибровки владелец СИ будет вводить показания с калибруемого СИ и отправлять их управляющей программе. Горящий красный индикатор сообщает о наличии ошибки. Описание ошибки выводится на экран. При передаче данных управляющей программе загорится зелёный индикатор. В расширенных настройках имеется возможность изменить используемые в процессе обмена данными порты.

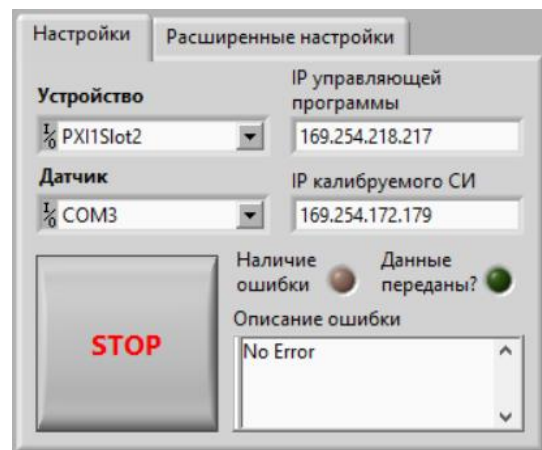


Рис. 4. Интерфейс программы на PXI

Рассмотренные операции повторяются для каждого измерения, необходимого для составления калибровочной таблицы. Список и количество контрольных точек должны быть приведены в методике калибровки. Информация о методах обработки результатов прямых многократных измерений приведена в ГОСТ Р 8.736-2011 [65]. Результаты записываются в протокол, затем оформляется сертификат о калибровке, подписанный электронной цифровой подписью.

На Рис. 5 показана упрощённая схема алгоритма без взаимодействия программы с аппаратной частью, таких, как инициализация, конфигурация, выключение и т.д. Жёлтым цветом обозначены действия, выполняемые управляющей программой, зелёным – управляемой, фиолетовым – калибруемым СИ.

Сформированный файл используется в процедуре расчёта неопределённости измерений, что связано с требованиями к содержанию методик калибровки [66]. В результате выполнения программы формируется файл с результатами измерений, температуры и влажности, при которых проводилась калибровка, даётся рассчитанная неопределённость и абсолютная погрешность измерений в заданных точках. Наиболее подробная информация о понятии «неопределённость» и о методах её расчёта приведена в JCGM 100:2008 [67].

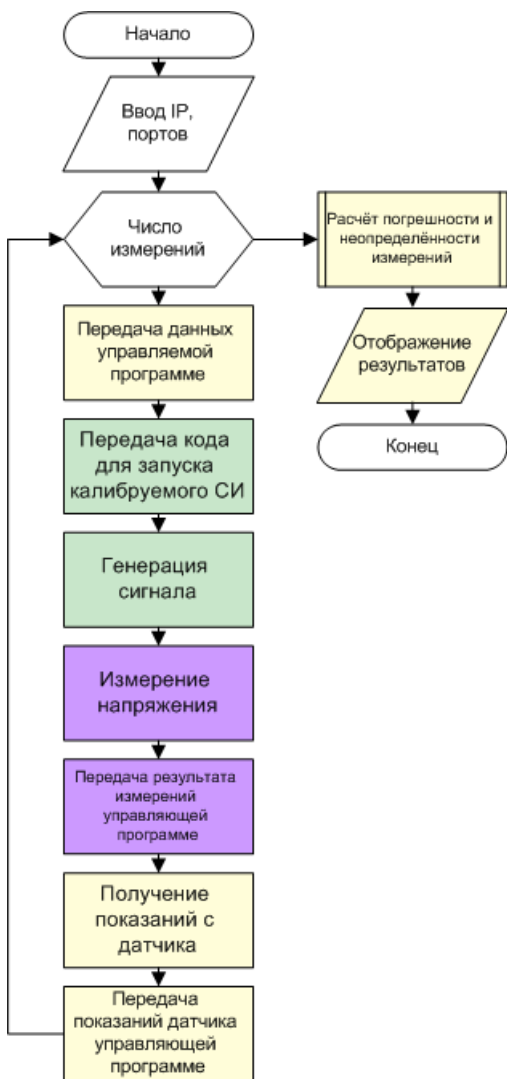


Рис. 5. Алгоритм калибровки

В идеальном случае дистанционная калибровка предполагает программирование как эталонного, так и калибруемого СИ. Тогда появится возможность полностью автоматизировать процесс калибровки путём управления двумя СИ одновременно, то есть синхронно во времени. Для этой цели существуют технические решения со встроенным или съёмным контроллером или контролем по GPS [44]. Контроллер будет управлять передачей эталонного сигнала на калибруемое СИ, а подключённое к контроллеру

калибруемое СИ будет передавать полученные результаты измерений в реальном времени [49].

### III. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Для проведения калибровки требуется использовать СИ утверждённого типа [68]. На сегодняшний день подавляющее большинство используемых СИ за редким исключением не имеют возможности передачи результатов измерений в реальном времени, из-за чего система требует ввод показания СИ вручную. В связи с этим невозможно использование данного способа в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [1]. Но вне сферы государственного регулирования данный способ прекрасно подходит. Именно к ней относятся калибровка, которая поименована только в одной статье закона [1].

При разработке методики калибровки требуется учитывать «Положение о российской системе калибровки» [69] и «Порядок организации деятельности российской системы калибровки» [70]. Данные документы были разработаны ФГУП «ВНИИМС», актуализируют нормативную базу системы калибровки и вводятся взамен документов, которые были введены в действие ранее.

Метрологическая сопоставимость результатов измерений обеспечивается благодаря использованию методик для проведения калибровки. Они содержат не только описание процедуры калибровки, но и требования к вспомогательному оборудованию, квалификации сотрудников, условиям проведения калибровки и формулы для расчёта метрологических характеристик. Необходимость в многообразии методик возникла в первую очередь из-за постоянного увеличения количества СИ с уникальными свойствами. Общие требования к содержанию и изложению методик калибровки приведены в ГОСТ Р 8.879-2014, на основании которого и была разработана методика дистанционной калибровки. Данный ГОСТ разработан на основе ГОСТ ИСО/МЭК 1725-2009 [71], который был заменен на ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [72]. Несмотря на конкретный перечень разделов, которые должна содержать методика, в пункте 4.3 указано, что в обоснованных случаях допускается объединять, добавлять или исключать разделы. Благодаря этому данные требования легко использовать для разработки методик калибровки.

В настоящее время калибровка СИ, не предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, является добровольной. Более того, выполняющие калибровку СИ юридические лица и предприниматели могут быть не аккредитованы в области обеспечения единства измерений. Используемые для калибровки СИ должны быть утверждённого типа и иметь действующие

свидетельства о поверке [68]. Данное условие всегда выполняется, поскольку крупные компании, занимающиеся производством программируемых СИ, утверждают их как тип. Требуется только проведение регулярной поверки СИ, обеспечивающих передачу размеров единиц средствам измерений.

При отсутствии аккредитации на проведение калибровки нет никаких подтверждений достоверности результатов. Из-за этого не удастся избежать проблем с заказчиками, которые не признают достоверность результатов калибровки без соответствующего документа, выданного аккредитованной лабораторией. Данные результаты нельзя признать при поверке СИ [73]. Также в ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 [72] указано, что признание результатов калибровки разными странами будет достигнуто в случае, если лаборатория аккредитована органами по аккредитации, признанными с подобными органами других стран. Данный ГОСТ относится к системе менеджмента качества, из-за чего использование результатов калибровки неаккредитованной лаборатории может быть недопустимо.

Одним из удачных примеров сферы применения дистанционной калибровки является образование [74, 75]. На сегодняшний день СИ образовательных учреждений не входят в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений. Приближённое к вандализации использование лабораторных СИ повышает погрешность и неопределённость до недопустимых значений, а регулярная закупка нового оборудования – это редкость в настоящее время. Использование технологии дистанционной калибровки позволит составить калибровочные таблицы, которые в дальнейшем будут использоваться при измерениях. Данное решение поможет уменьшить неопределённость СИ до значений, присущих использованному средству калибровки [76]. Таким образом, удастся избежать значительных расходов на обновление оборудования, при этом усовершенствовав аппаратное обеспечение организации.

На текущий момент в стране не существует полностью функционирующей программно-аппаратной системы дистанционной калибровки СИ и соответствующей методики. Проведение аккредитации лаборатории – это крайне длительное и затратное мероприятие, на которое ни одна организация не пойдёт без весомой причины. Поэтому дистанционная калибровка является выходом из положения. В первую очередь это связано со сложными требованиями к калибровочной лаборатории [70]. Прослеживаемость результатов измерений [10] до государственных эталонов решается использованием СИ утверждённого типа, а разработка новой методики калибровки является выполнимой задачей. На этапе разработки методики калибровки требуется учесть, в каких условиях СИ обычно используются, указав

соответствующие условия проведения калибровки. Проблему хранения средств калибровки можно решить на основе соглашения между предприятием и аккредитованной лабораторией: в первом случае хранение средства калибровки осуществляется в аккредитованной лаборатории, а при необходимости оно транспортируется к заказчику, во втором – необходимо наличие у заказчика специального помещения, обеспечивающего необходимые условия хранения эталона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расширение арсенала программируемых СИ открывает новые возможности для совершенствования способов передачи единиц электрических величин. Из-за высокого роста спроса на метрологические услуги, обусловленные повышением количества используемых СИ, аккредитованные центры не могут справляться с таким количеством СИ без усовершенствования действующей системы передачи единиц величин. На протяжении многих лет она не претерпевала существенных изменений, но теперь морально и технологически устарела [2–4]. Большое количество автоматических СИ, используемых на производстве, требует постоянного метрологического обслуживания, в том числе калибровки. Дистанционная калибровка является одним из наиболее перспективных направлений в автоматизации метрологических работ и предоставляет возможность своевременного мониторинга метрологических характеристик СИ, находит всё большее распространение вследствие снижения временных затрат на проведение метрологических работ, снижения их полной стоимости и решения ряда проблем, связанных с транспортировкой СИ, отправкой поверителей и рабочих эталонов. Метрологическое обеспечение предприятий в едином информационном пространстве, так называемом метрологическом облаке, должно обеспечивать постоянное повышение точности СИ для цифровой экономики, учитывать многократное возрастание количества СИ, возможность дистанционных поверок и калибровок с применением технологий цифровых двойников [21].

Будущие исследования должны быть направлены на повышение надёжности и адаптивности систем дистанционной калибровки для поддержания высокой точности, снижению рисков [41], особенно в сложных и динамичных условиях обеспечения устойчивого развития [40]. Следует изучить стандартизированные протоколы взаимодействия разнородных устройств и моделирование неопределённости для повышения надёжности системы. Следует также изучать опыт дистанционных поверок в одних отраслях для использования в других. Эти усилия могли бы способствовать развитию открытых, признанных законодательством и заинтересованными сторонами

калибровочных облачных экосистем с широким спектром приложений в точных измерениях и интеллектуальном мониторинге.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 26. – Ст. 3021.
- [2] Taymanov R., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // *Measurement*. – 2010. – Vol. 43. – № 7. – Pp. 869-877.
- [3] Jun Z., Quan W., Xiwen C., Wenxuan W., Jian C., Qingjin R., Tao S. Modeling and network simulation of "Internet +" remote calibration method // *Journal of Computer Applications*. – 2019. – Vol. 39. – № 2. – Pp. 189-193. – JST Material Number: C2535A. – CODEN: JYIDU.
- [4] Данилов А.А. Направления совершенствования измерительных систем и их метрологического обеспечения // *Измерительная техника*. – 2023. – № 8. – С. 24-29. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29. – eLIBRARY ID: 54499744. – EDN: CVDWFO.
- [5] Cristaldi L., Ferrero A., Salicone S. A distributed system for electric power quality measurement // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2002. – Vol. 51. – № 4. – Pp. 776-781.
- [6] Kutuzov D., Osovsky A., Stukach O., Starov D. Modeling of IIoT Traffic Processing by Intra-Chip NoC Routers of 5G/6G Networks / 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 13-15 May 2021, Kazan, Russia. – eLIBRARY ID: 46825100. – DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874.
- [7] Osovsky A., Kutuzov D., Starov D., Bakalaeva R., Stukach O. Comparison of Machine Learning Methods for IoT and IIoT Traffic Prediction / International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – 2024. – October 02-03, Sochi, Russian Federation. – Doi: 10.1109/SED63331.2024.10741069.
- [8] Моделирование обслуживания трафика маршрутизаторами технологии Интернета вещей (IoT) / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N 2019661408. – Д.В. Кузузов, А.В. Осовский, О.В. Стукач, Д.В. Старов, Е.А. Моторина. – Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Астраханский государственный технический университет". – Заявка N 2019660265 от 19 августа 2019 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28 августа 2019 г. – eLIBRARY ID: 40880119.
- [9] Dimitrijevic B.R., Simic M.M. Remote wireless calibration of equipment in the distributed measurement systems // *Proceedings of Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIS-2007*. – Serbia, September 26-28, 2007. – Pp. 479-482.
- [10] Ершов И.А., Аймагамбетова Р.Ж., Стукач О.В. Технология блокчейн в обеспечении метрологической прослеживаемости // XI Междунар. IEEE научно-технич. конф. "Динамика систем, механизмов и машин". – Омск, Омский государственный технический университет, 14-16 ноября 2017. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 57-61. – Doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-57-61. – ISSN: 2310-9793. – eLIBRARY ID: 30624963).
- [11] Aimagmbetova R.Zh., Ershov I.A., Stukach O.V. Towards the problem of measurement traceability in the Internet of measurement concept / *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Conference, Omsk, 14-16 Nov. 2017. – ISBN: 978-1-5386-1820-2. – Doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239425. – eLIBRARY ID: 35541726.
- [12] Воронова А.А., Супчинский О.П. Зарубежный и отечественный опыт внедрения дистанционной поверки и калибровки средств измерений / Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте. – Материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск, Омский государственный университет путей сообщения, 27-28 октября 2022. – С. 137-146. – eLIBRARY ID: 49789520. – EDN: DTWDOG.
- [13] Adibi M.M., Thome D.K. Remote Measurement Calibration // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 1986. – Vol. PWRS-1. – No. 2. – May. – Pp. 194-199.
- [14] Dudley R.A., Ridler N.M. Internet calibration direct to national measurement standards for automatic network analyzers // *Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2001*. – Budapest, May 21-23, 2001. – Pp. 255-258.
- [15] O'Dowd R., Maxwell D., Farrell T., Dunne J. Remote characterization of optoelectronic devices over the internet / *Proceedings of 4th Optical Fibre Measurement Conference*. – Teddington, UK, October 24-27, 1997. – Pp. 155-158.
- [16] Baca L.B., Duda L., Walker R., Oldham N., Parker M. Internet-Based Calibration of a Multifunction Calibrator // *National Conference of Standards Laboratories*. – Toronto, Canada, April 12-14, 2000. – Pp. 10-12.
- [17] Панько С.П., Мишуков А.В. Технология метрологической аттестации в дистанционном режиме // *Законодательная и прикладная метрология*. – 2010. – № 3 (109). – С. 48-49.
- [18] Jia-Lun W., Chang P.C., Shinn-Yan L., Huang-Tien L., Chia-Shu L. Remote time and frequency calibration system for telecommunication synchronization applications / *Network Operations and Management Symposium APNOMS-2011*. – Taipei, September 21-23, 2011. – Pp. 1-6.
- [19] Ершов И.А. Реализация программы «Цифровая экономика» в системе обеспечения единства измерений // *Автоматика и программная инженерия*. – 2018. – № 1(23). – С. 105-109.
- [20] Попов А. А. Цифровизация обеспечения метрологической прослеживаемости средств измерений и стандартных образцов через облачные технологии: современное состояние и перспективы развития // *Эталоны. Стандартные образцы*. – 2022. – Т. 18. – № 3. – С. 57-70. – eLIBRARY ID: 50003329. – EDN: EIOJVD. – Doi: 10.20915/2077-1177-2022-18-3-57-70.
- [21] Брусакова И.А. Цифровые двойники измерительных процедур // Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем / Сб. докладов Межд. конф. С.-Петербург, 15-17 марта 2022. – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). – С. 70-72. – eLIBRARY ID: 48116498. – EDN: CELTBI.
- [22] Xu-Li W., Yu-Xiao Z. Exploit of Remote Monitoring and Control System for Bell Prover Device Based on Virtual Instrument // *Proceedings of International Symposium on Computational Intelligence and Design ISCID-2012*. – Hangzhou, October 28-29, 2012. – Pp. 178-181.
- [23] Толочко Т.К., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Дистанционная калибровка средств измерений // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. – 2008. – № 1 (30). – С. 8-43.
- [24] Jurčević M., Hegeduš H., Golub M. Generic System for Remote Testing and Calibration of Measuring Instruments: Security Architecture // *Measurement science review*. – 2010. – Vol. 10. – № 2. – Pp. 50-55.
- [25] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote Calibration Using Mobile, Multiagent Technology // *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – Pp. 24-30.
- [26] Iwama T., Kurihara N., Imae M., Suzuyama T., Kotake N., Otsuka A. Frequency Standards Calibration System and Remote Calibration System // *National Institute of Information and Communications Technology*. – 2003. – Vol. 54. – № 1-2. – P. 195-204.
- [27] Bertocco M., Ferraris F., Offelli C., Parvis M. A client-server architecture for distributed measurement systems // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1998. – Vol. 47. – № 5. – Pp. 1143-1148.

- [28] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote calibration using mobile, multiagent technology // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – February. – Pp. 24-30. – Doi: 10.1109/TIM.2004.838139.
- [29] Wang Q., Li H., Wang H., Zhang J., Fu J. A Remote Calibration Device Using Edge Intelligence // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – № 1. – P. 322. – Doi: 10.3390/s22010322.
- [30] Wang Q., Zhang J., Lei M., Li H., Peng K., Hu M. Toward Wide Area Remote Sensor Calibrations: Applications and Approaches // *IEEE Sensors Journal*. – 2024. – Vol. 24. – № 6. – Pp. 8991-9001. – Doi: 10.1109/JSEN.2024.3352253.
- [31] Zhao Q., Qi X., Wang Q., Wang B. Establishment of Electrical Equipment on Site Remote Calibration System / 2024 IEEE China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). – Wuhan, China, 06-08 November 2024. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/CIYCEE63099.2024.10846498.
- [32] Amicone D., Bernieri A., Ferrigno L., Laracca M. A smart add-on device for the remote calibration of electrical energy meters // 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Singapore, 05-07 May 2009. – Pp. 1599-1604. – Doi: 10.1109/IMTC.2009.5168710.
- [33] Tian W., Wang X., Yang Z., Li Q., Sun L., Wang D., Wang Z. A Remote Automatic Detection and Calibration Device for AC Watt-hour Meters // *Journal of Physics. Conf. Series*. – 2021. – Vol. 2005. – P. 012226.
- [34] Amicone D., Bernieri A., Betta G., Ferrigno L., Laracca M. On the Remote Calibration of Electrical Energy Meters / *Proc. IMEKO TC4*. – Firenze, Italy. – 2008. – <https://www.imeko.info/publications/tc4-2008/IMEKO-TC4-2008-165.pdf>
- [35] Zha Z., Ge H., Zou C., Long F., He X., Wu G., Dong C., Deng T., Xu J. Synchronous Remote Calibration for Electricity Meters: Application and Optimization // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – № 3. – P. 1259. – Doi: 10.3390/app15031259.
- [36] Wang Q., Fu J., Han X., Yin X., Zhang J., Qi X., Zhang X. Design and Implementation of a Novel Intelligent Remote Calibration System Based on Edge Intelligence // *Symmetry*. – 2025. – Vol. 17. – № 9. – P. 1434. – Doi: 10.3390/sym17091434.
- [37] Verhelst B., Rens S., Rens J., Knockaert J., Desmet J. On the Remote Calibration of Instrumentation Transformers: Influence of Temperature // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 12. – P. 4744. – Doi: 10.3390/en16124744.
- [38] Liu M., Su X., Li H., Liao H., Mo S. Remote Calibration Technology Solution for Conventional Substation Secondary Systems / 2025 5th International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE). – Guangzhou, China, 14-16 November 2025. – Pp. 851-855. – Doi: 10.1109/ICNEPE67923.2025.11384217.
- [39] Han K., Ding, C., Yu, L., Chen, Q. Research on the Application of Time and Frequency Remote Calibration Based on NIMDO // *Metrology Science and Technology*. – 2021. – Vol. 65. – Pp. 9-12.
- [40] Дривольская Н.А., Нуриев А.Г., Веледеева К.А., Денисова Е.Д. Метрологические средства измерений как элемент устойчивого развития железнодорожной отрасли // *Транспортное дело России*. – 2023. – № 6. – С. 378-380. – DOI: 10.52375/20728689\_2023\_6\_378. – eLIBRARY ID: 60016282. – EDN: QGJKZ.
- [41] Толмачев В.В. Оценка и управление рисками эталонов, участвующих в дистанционной поверке // *Законодательная и прикладная метрология*. – 2019. – № 2(159). – С. 35-38. – ISSN: 2782-5418. – eLIBRARY ID: 37711096. – EDN: PZCUUC.
- [42] Чистяков Э.Ю., Павлов А.Ю., Нуриев А.Г., Афанасьев В.В., Гренадер Я.А. Дистанционная калибровка динамических вагонных весов // *Бюллетень результатов научных исследований*. – 2024. – № 4. – С. 103-111. – DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-103-111. – eLIBRARY ID: 78869045. – EDN: PVDKHN.
- [43] Чистяков Э.Ю., Павлов А.Ю., Гренадер Я.А., Нуриев А.Г. Дистанционная калибровка шаблонов в районах крайнего севера // *Известия петербургского университета путей сообщения*. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 133-141. – DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-133-141. – eLIBRARY ID: 50389719. – EDN: XFHDDJ.
- [44] Fang L., Duan S., Li Y., Ma X., Lan K. A New Model for Remote Calibration of Voltage Source Based on GPS Common-View Method // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – Vol. 72. – Pp. 1-9. – Art 5501309. – Doi: 10.1109/TIM.2023.3239920.
- [45] Helmy M., Raouf A., Ali Rasha S.M., Gadelrab M.S. Construction and remote calibration of an automated resistance measuring system // *MAPAN*. – 2011. – Vol. 26. – Pp. 125-131. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s12647-011-0013-6>.
- [46] Nakutis Z., Saunoris M., Ramanauskas R., Daunoras V. A method for remote wattmeter calibration / 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Turin, Italy, 22-25 May 2017. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969766.
- [47] Jeang Y.L., Chen L.B., Huang C.P., Hsu Y.H., Yeh M.Y., Yang K.M. Design of FPGA-based adaptive remote calibration control system / 2003 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology (FPT). – Tokyo, Japan, 17 December 2003. – Pp. 299-302. – IEEE Cat. No.03EX798.
- [48] Gunawan T.S., Anuar M.H., Mira K., Zuriati J. Design of power factor meter using internet of things for power factor improvement remote monitoring and data logging // *Indonesia Journal of Electronics Engineering and Computer Science*. – 2020. – Vol. 17. – Pp. 700-709.
- [49] Ершов И.А. Стукач О.В. Архитектура системы дистанционной калибровки как часть концепции Internet of Measurements (IoM) / *Современные технологии поддержки принятия решений в экономике: сб. тр. III Всеросс. науч.-практ. конф., 24-25 ноября 2016 г. Юрга. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 140-142. – eLIBRARY ID: 28159635.*
- [50] Chen L., Shao Y., Fu Y., Xie M. A remote calibration system for industrial thermometers / *Proceedings of Industrial Electronics and Applications ICIEA-2013*. – Melbourne, June 19-21, 2013. – Pp. 1574-1577.
- [51] Kobata T., Kojima M., Kajikawa H. Development of remote calibration system for pressure standard // *Measurement*. – 2012. – Vol. 45. – Pp. 2482-2485. – Doi: 10.1016/j.measurement.2011.10.048.
- [52] Канаев С.А., Москаленко О.В., Хваткова А.А. Разработка автоматизированной системы для проверки и калибровки средств измерения давления // *Приборы*. – 2008. – № 6. – С. 40-42.
- [53] Mamaghani B., Salvaggio C. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – № 20. – P. 4453. – Doi: 10.3390/s19204453.
- [54] Conlin M.P., Adams P.N., Wilkinson B., Dusek G., Palmsten M.L., Brown J.A. SurfRCaT: A tool for remote calibration of pre-existing coastal cameras to enable their use as quantitative coastal monitoring tools // *SoftwareX*. – Vol. 12. – July-December 2020. – Art. 100584. – doi: 10.1016/j.softx.2020.100584.
- [55] Simarro G., Ribas F., Blvarez A., Guillin J., Chic T., Orfila A. ULISES: An open source code for extrinsic calibrations and planview generations in coastal video monitoring systems // *Journal Coast Res*. – 2017. – Vol. 335. – № 5. – P. 1217-27. – Doi: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00022.1.
- [56] Долматов А.В., Ермаков К.А., Лавриков В.В. Комплекс автоматизированной калибровки тепловизионной системы на базе Matlab // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2012. – № 2. – С. 59-63.
- [57] Dai T., De Salvo A., Diehl E., Di Mattia A., Kennedy J., McKee S., Orestano D., Pasqualucci E., Petrucci F., Rauscher F. The ATLAS MDT remote calibration centers // *Journal of Physics: Conference Series*, 2010. – Vol. 219. – Online Computing. – P. 022028. – Doi: 10.1088/1742-6596/219/2/022028.
- [58] Комаров Н.М., Кудрявцев А.В., Парышкин Ю.А. Технические решения по системе управления затвора первого зеркала и

- системе дистанционной калибровки диагностики "активная спектроскопия" / Физико-технические интеллектуальные системы (ФТИС-2024). – III Научно-практическая конференция. – Тамбов, 2024. – С. 37. – eLIBRARY ID: 62679137. – EDN: LOTHJN.
- [59] Асадов Х.Г., Алиева А.Д., Гумбатов Д.А. Вопросы радиометрической калибровки устройств дистанционного зондирования, установленных на борту БПЛА // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2024. – Т. 29. – № 2. – С. 41-50. – eLIBRARY ID: 65640308. – EDN: MOKDGX . – DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-2-41-50.
- [60] Vito S.D., Elia G.D., Ferlito S., Esposito E., Piantadosi G., Francia G.D. Remote Calibration strategies for Low Cost Air Quality Multisensors: a performance comparison / 2024 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN). – Grapevine, USA, 12-15 May 2024. – Pp. 1-4. – Doi: 10.1109/ISOEN61239.2024.10556107.
- [61] Xiujie Y., Yan C., Rong L., Yanling L., Yixi L. Development of a remote calibration system for monitoring ambient temperature and humidity // Chinese Institute of Testing Technology. – Chengdu, Sichuan, China, 610021. – Pp. 186-190. – DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2024.06.029.
- [62] Mellit A., Benghanem M., Herrak O., Messalaoui A. Design of a Novel Remote Monitoring System for Smart Greenhouses Using the Internet of Things and Deep Convolutional Neural Networks // Energies. – 2021. – Vol. 14. – Art. 5045.
- [63] Головастов А.А. Стандарт – PXI технология и оборудование для построения контрольно-измерительных систем // Современные технологии автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 132-138.
- [64] Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 / Под. ред. Бутырина П.А. – М.: ДМК Пресс. – 2005. – 264 С.
- [65] ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ. – 2013.
- [66] ГОСТ Р 8.879-2014 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – М.: Стандартинформ. – 2015.
- [67] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – JCGM, 2008. – 120 p.
- [68] ПР 50.2.016-94 ГСИ. Требования к выполнению калибровочных работ. – М.: Госстандарт России. – 1995.
- [69] РД РСК 01-2014 Положение о российской системе калибровки. – Сборник руководящих документов Российской системы калибровки. – М.: АНО «РСК-Консалтинг». – 2014.
- [70] РД РСК 02-2014 Порядок организации деятельности российской системы калибровки. – Сборник руководящих документов Российской системы калибровки. – М.: АНО «РСК-Консалтинг». – 2014.
- [71] ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Стандартинформ. – 2018.
- [72] ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Стандартинформ. – 2019.
- [73] Постановление Правительства РФ № 311 от 2 апреля 2015 года «Об утверждении Положения о признании результатов калибровки при поверке средств измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2015. – № 15. – Ст. 2272.
- [74] Spoedler H.J.W. Virtual instruments and virtual environments // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 1999. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 14-19.
- [75] Cristaldi L., Ferrero A., Piuri V. Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: What is really useful, innovative, and technically sound // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1999. – Vol. 42. – № 3. – Pp. 20-27.
- [76] De Capua C., Liccardo A., Morello R. On the web service-based remote didactical laboratory: further developments and improvements / Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2005. – Canada, Ottawa, May 16-19, 2005. – Pp. 1692-1696.

### Информация об авторах

Стукач Олег Владимирович, д.т.н., профессор кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, профессор департамента Электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, e-mail: [tomsk@ieee.org](mailto:tomsk@ieee.org), ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Ершов Иван Анатольевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, e-mail: [ershov@corp.nstu.ru](mailto:ershov@corp.nstu.ru), ORCID: 0000-0003-1524-6508.

Improvement of calibration technology for electrical measurements based on modular devices in the concept of Internet of Measurement (IoM)

Oleg Stukach <sup>1,2</sup>, Ivan Ershov <sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research University Higher School of Economics  
<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University

**Abstract** – The growth in the amount of programming measuring instruments and the demand for metrological services open the new possibilities to the development of a remote calibration concept, which significantly reduces financial, logistical costs, and working hours of a calibration laboratory employee, increases the efficiency of metrological services and, ultimately, significantly improves the system of transfer of physical units. The introduction of the remote calibration system is important for large enterprises with geographically distributed branches to ensure the fulfillment of the equipment calibration schedule. The main feature of the remote calibration is the process automation of and the network control of measuring instruments. A description of the remote calibration hardware and software via Ethernet PXI-based modular devices within LabVIEW software of National Instruments is given. The simplicity of the interface of the control programs for various measuring instruments allows to use the designed system with other measuring instruments without significant changes in the software. The key features of the procedure for the remote calibration of programmable voltmeters are described. The results were used to develop a methodology for remote calibration of programming voltmeters. Based on the current laws and

regulations, some recommendations are provided for the practical use of the proposed system.

**Keywords** – measuring instrument, verification, software and hardware complex, calibration methodology, intelligent information and measurement system, remote calibration, legislative metrology, regulatory framework, electrical quantities, intelligent sensor, Internet of Measurement, IoM, LabVIEW, measurement, measuring procedure, metrological traceability, measure of metrological reliability, uncertainty of measurements, Arshin, standard transportation, digital twin, metrology 4.0, metrological cloud, digital metrology, digitalization.

## REFERENCES

- [1] Federalnyi zakon № 102-FZ ot 26.06.2008 "Ob obespechenii edinstva izmerenii" // Sobranie zakonodatelstva RF. – 2008. – № 26. – St. 3021. (in Russian)
- [2] Taymanov R., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // Measurement. – 2010. – Vol. 43. – № 7. – Pp. 869-877.
- [3] Jun Z., Quan W., Xiwen C., Wenxuan W., Jian C., Qingjin R., Tao S. Modeling and network simulation of "Internet +" remote calibration method // Journal of Computer Applications. – 2019. – Vol. 39. – № 2. – Pp. 189-193. – JST Material Number: C2535A. – CODEN: JYIUDU.
- [4] Danilov A.A. Areas for improvement of measuring systems and their metrological support // Measurement Techniques. – 2023. – Vol. 66. – No 8. – С. 570-575. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29. – eLIBRARY ID: 54499744. – EDN: CVDWFO.
- [5] Cristaldi L., Ferrero A., Salicone S. A distributed system for electric power quality measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51. – № 4. – Pp. 776-781.
- [6] Kutuzov D., Osovsky A., Stukach O., Starov D. Modeling of IIoT Traffic Processing by Intra-Chip NoC Routers of 5G/6G Networks / 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 13-15 May 2021, Kazan, Russia. – eLIBRARY ID: 46825100. – DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874.
- [7] Osovsky A., Kutuzov D., Starov D., Bakalaeva R., Stukach O. Comparison of Machine Learning Methods for IoT and IIoT Traffic Prediction / International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – 2024. – October 02-03, Sochi, Russian Federation. – Doi: 10.1109/SED63331.2024.10741069.
- [8] Kutuzov D.V., Osovsky A.V., Stukach O.V., Starov D.V., Motorina E.A. Modeling of traffic routing by IoT / Appl. N 2019660265, August 19, 2019. – Software Reg. N 2019661408, August 28, 2019. – eLIBRARY ID: 40880119 (in Russian).
- [9] Dimitrijevic B.R., Simic M.M. Remote wireless calibration of equipment in the distributed measurement systems / Proceedings of Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIKS-2007. – Serbia, September 26-28, 2007. – Pp. 479-482.
- [10] Ershov I.A., Aimagambetova R.Zh., Stukach O.V. The blockchain technology in the metrology traceability / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2017. – Omsk State Technical University. – Omsk, Russian Federation, 2017. – Vol. 5. – No. 4. – Pp. 57-61. – DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-57-61. – ISSN: 2310-9793. – eLIBRARY ID: 30624963 (in Russian).
- [11] Aimagambetova R.Zh., Ershov I.A., Stukach O.V. Towards the problem of measurement traceability in the Internet of measurement concept / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Conference, Omsk, 14-16 Nov. 2017. – ISBN: 978-1-5386-1820-2. – Doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239425. – eLIBRARY ID: 35541726.
- [12] Voronova A.A., Supchinsky O.P. Foreign and domestic experience in introducing remote verification and calibration measurement instruments / Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport. – Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. – Omsk, Omsk State Transport University, October 27-28, 2022. – Pp. 137-146. – eLIBRARY ID: 49789520. – EDN: DTWDOG (in Russian).
- [13] Adibi M.M., Thome D.K. Remote Measurement Calibration // IEEE Transactions on Power Systems. – 1986. – Vol. PWRS-1. – No. 2. – May. – Pp. 194-199.
- [14] Dudley R.A., Ridler N.M. Internet calibration direct to national measurement standards for automatic network analyzers // Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2001. – Budapest, May 21-23, 2001. – Pp. 255-258.
- [15] O'Dowd R., Maxwell D., Farrell T., Dunne J. Remote characterization of optoelectronic devices over the internet / Proceedings of 4th Optical Fibre Measurement Conference. – Teddington, UK, October 24-27, 1997. – Pp. 155-158.
- [16] Baca L.B., Duda L., Walker R., Oldham N., Parker M. Internet-Based Calibration of a Multifunction Calibrator // National Conference of Standards Laboratories. – Toronto, Canada, April 12-14, 2000. – Pp. 10-12.
- [17] Panko S.P., Mishurov A.V. Technology of metrological attestation in remote mode // Legislative and applied metrology. – 2010. – № 3 (109). – Pp. 48-49 (in Russian).
- [18] Jia-Lun W., Chang P.C., Shinn-Yan L., Huang-Tien L., Chia-Shu L. Remote time and frequency calibration system for telecommunication synchronization applications / Network Operations and Management Symposium APNOMS-2011. – Taipei, September 21-23, 2011. – Pp. 1-6.
- [19] Ershov I.A. Implementation of the "Digital Economics" program in the state measurement unity transfer system // Automatics & software engineering. – 2018. – № 1(23). – pp. 105-109 (in Russian).
- [20] Popov A.A. Digitalization of ensuring metrological traceability of measuring instruments and reference materials through cloud-based technologies: current state and development prospects // Standard devices. – 2022. – Vol. 18. – № 3. – Pp. 57-70. – eLIBRARY ID: 50003329. – EDN: EIOJVD. – Doi: 10.20915/2077-1177-2022-18-3-57-70 (in Russian).
- [21] Brusakova I. A. Digital twins of measurement procedures // Design and quality assurance of information processes and systems / Proceedings of the International Conference, St.-Petersburg, March 15-17, 2022. – V.I. Ulyanov (Lenin) St.-Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg. – Pp. 70-72. – eLIBRARY ID: 48116498. – EDN: CELTBI (in Russian).
- [22] Xu-Li W., Yu-Xiao Z. Exploit of Remote Monitoring and Control System for Bell Prover Device Based on Virtual Instrument // Proceedings of International Symposium on Computational Intelligence and Design ISCID-2012. – Hangzhou, October 28-29, 2012. – Pp. 178-181.
- [23] Tolochko T.K., Gusinsky A.V., Kostrikin A.M. Remote calibration of measuring instruments // Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. – 2008. – № 1 (30). – Pp. 38-43 (in Russian).
- [24] Jurčević M., Hegeduš H., Golub M. Generic System for Remote Testing and Calibration of Measuring Instruments: Security Architecture // Measurement science review. – 2010. – Vol. 10. – № 2. – Pp. 50-55.
- [25] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote Calibration Using Mobile, Multiagent Technology // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – Pp. 24-30.
- [26] Iwama T., Kurihara N., Imae M., Suzuyama T., Kotake N., Otsuka A. Frequency Standards Calibration System and Remote Calibration System // National Institute of Information and Communications Technology. – 2003. – Vol. 54. – № 1-2. – P. 195-204.
- [27] Bertocco M., Ferraris F., Offelli C., Parvis M. A client-server architecture for distributed measurement systems // IEEE

- Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1998. – Vol. 47. – № 5. – Pp. 1143-1148.
- [28] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote calibration using mobile, multiagent technology // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – February. – Pp. 24-30. – Doi: 10.1109/TIM.2004.838139.
- [29] Wang Q., Li H., Wang H., Zhang J., Fu J. A Remote Calibration Device Using Edge Intelligence // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 1. – P. 322. – Doi: 10.3390/s22010322.
- [30] Wang Q., Zhang J., Lei M., Li H., Peng K., Hu M. Toward Wide Area Remote Sensor Calibrations: Applications and Approaches // IEEE Sensors Journal. – 2024. – Vol. 24. – № 6. – Pp. 8991-9001. – Doi: 10.1109/JSEN.2024.3352253.
- [31] Zhao Q., Qi X., Wang Q., Wang B. Establishment of Electrical Equipment on Site Remote Calibration System / 2024 IEEE China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). – Wuhan, China, 06-08 November 2024. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/CIYCEE63099.2024.10846498.
- [32] Amicone D., Bernieri A., Ferrigno L., Laracca M. A smart add-on device for the remote calibration of electrical energy meters // 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Singapore, 05-07 May 2009. – Pp. 1599-1604. – Doi: 10.1109/IMTC.2009.5168710.
- [33] Tian W., Wang X., Yang Z., Li Q., Sun L., Wang D., Wang Z. A Remote Automatic Detection and Calibration Device for AC Watt-hour Meters // Journal of Physics. Conf. Series. – 2021. – Vol. 2005. – P. 012226.
- [34] Amicone D., Bernieri A., Betta G., Ferrigno L., Laracca M. On the Remote Calibration of Electrical Energy Meters / Proc. IMEKO TC4. – Firenze, Italy. – 2008. – <https://www.imeko.info/publications/tc4-2008/IMEKO-TC4-2008-165.pdf>
- [35] Zha Z., Ge H., Zou C., Long F., He X., Wu G., Dong C., Deng T., Xu J. Synchronous Remote Calibration for Electricity Meters: Application and Optimization // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – № 3. – P. 1259. – Doi: 10.3390/app15031259.
- [36] Wang Q., Fu J., Han X., Yin X., Zhang J., Qi X., Zhang X. Design and Implementation of a Novel Intelligent Remote Calibration System Based on Edge Intelligence // Symmetry. – 2025. – Vol. 17. – № 9. – P. 1434. – Doi: 10.3390/sym17091434.
- [37] Verhelst B., Rens S., Rens J., Knockaert J., Desmet J. On the Remote Calibration of Instrumentation Transformers: Influence of Temperature // Energies. – 2023. – Vol. 16. – № 12. – P. 4744. – Doi: 10.3390/en16124744.
- [38] Liu M., Su X., Li H., Liao H., Mo S. Remote Calibration Technology Solution for Conventional Substation Secondary Systems / 2025 5th International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE). – Guangzhou, China, 14-16 November 2025. – Pp. 851-855. – Doi: 10.1109/ICNEPE67923.2025.11384217.
- [39] Han K., Ding, C., Yu, L., Chen, Q. Research on the Application of Time and Frequency Remote Calibration Based on NIMDO // Metrology Science and Technology. – 2021. – Vol. 65. – Pp. 9-12.
- [40] Drivolskaya N.A., Nuriev A.G., Vedeleva K.A., Denisova E.D. Metrological measuring instruments as an element of sustainable development of the railway industry // Transportnoe delo Rossii. – 2023. – № 6. – Pp. 378-380. – DOI: 10.52375/20728689\_2023\_6\_378. – eLIBRARY ID: 60016282. – EDN: QGJIKZ (in Russian).
- [41] Tolmachev V.V. Risk assessment and risk management of measurement standards in remote verification // Legislative and applied metrology. – 2019. – № 2(159). – Pp. 35-38. – ISSN: 2782-5418. – eLibrary ID: 37711096. – EDN: PZCUUC (in Russian).
- [42] Chistyakov E.Yu., Pavlov A.Yu., Nuriev A.G., Afanas'ev V.V., Grenader Ya.A. Remote calibration of dynamic wagon scales // Bulletin of scientific research results. – 2024. – No. 4. – Pp. 103-111. – DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-103-111. – eLibrary ID: 78869045. – EDN: PVDKJH (in Russian).
- [43] Chistyakov E.Yu., Pavlov A.Yu., Grenader Ya.A., Nuriev A.G. Remote calibration of templates in the Far North districts // Izvestiya peterburgskogo universiteta putei soobsheniya. – 2023. – Vol. 20. – No. 1. – Pp. 133-141. – DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-133-141. – eLibrary ID: 50389719. – EDN: XFHDDJ (in Russian).
- [44] Fang L., Duan S., Li Y., Ma X., Lan K. A New Model for Remote Calibration of Voltage Source Based on GPS Common-View Method // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – Pp. 1-9. – Art 5501309. – Doi: 10.1109/TIM.2023.3239920.
- [45] Helmy M., Raouf A., Ali Rasha S.M., Gadelrab M.S. Construction and remote calibration of an automated resistance measuring system // MAPAN. – 2011. – Vol. 26. – Pp. 125-131. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s12647-011-0013-6>.
- [46] Nakutis Z., Saunoris M., Ramanauskas R., Daunoras V. A method for remote wattmeter calibration / 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Turin, Italy, 22-25 May 2017. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969766.
- [47] Jeang Y.L., Chen L.B., Huang C.P., Hsu Y.H., Yeh M.Y., Yang K.M. Design of FPGA-based adaptive remote calibration control system / 2003 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology (FPT). – Tokyo, Japan, 17 December 2003. – Pp. 299-302. – IEEE Cat. No.03EX798.
- [48] Gunawan T.S., Anuar M.H., Mira K., Zuriati J. Design of power factor meter using internet of things for power factor improvement remote monitoring and data logging // Indonesia Journal of Electronics Engineering and Computer Science. – 2020. – Vol. 17. – Pp. 700-709.
- [49] Ershov I.A., Stukach O.V. Arhitektura sistemy distancionnoj kalibrovki kak chast koncepcii Internet of Measurements (IoM) / Sovremennye tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenij v ekonomike: sbornik trudov III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – 24-25 November 2016, Yurga. – Tomsk: TPU. – 2016. – pp. 140-142 (in Russian).
- [50] Chen L., Shao Y., Fu Y., Xie M. A remote calibration system for industrial thermometers / Proceedings of Industrial Electronics and Applications ICIEA-2013. – Melbourne, June 19-21, 2013. – Pp. 1574-1577.
- [51] Kobata T., Kojima M., Kajikawa H. Development of remote calibration system for pressure standard // Measurement. – 2012. – Vol. 45. – Pp. 2482-2485. – Doi: 10.1016/j.measurement.2011.10.048.
- [52] Kanaev S.A., Moskalenko O.V., Khvatkova A.A. Development of an automated system for verification and calibration of pressure measuring instruments // Pribori. – 2008. – No 6. – Pp. 40-42 (in Russian).
- [53] Mamaghani B., Salvaggio C. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – № 20. – P. 4453. – Doi: 10.3390/s19204453.
- [54] Conlin M.P., Adams P.N., Wilkinson B., Dusek G., Palmsten M.L., Brown J.A. SurfRCaT: A tool for remote calibration of pre-existing coastal cameras to enable their use as quantitative coastal monitoring tools // SoftwareX. – Vol. 12. – July-December 2020. – Art. 100584. – doi: 10.1016/j.softx.2020.100584.
- [55] Simarro G., Ribas F., Blvarez A., Guillin J., Chic T., Orfila A. ULISES: An open source code for extrinsic calibrations and planview generations in coastal video monitoring systems // Journal Coast Res. – 2017. – Vol. 335. – № 5. – P. 1217-27. – Doi: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00022.1.
- [56] Dolmatov A.V., Ermakov K.A., Lavrikov V.V. The complex of automated calibration of a thermal imaging system based on Matlab // Bulletin of Yugorsky State University. – 2012. – No. 2. – Pp. 59-63 (in Russian).
- [57] Dai T., De Salvo A., Diehl E., Di Mattia A., Kennedy J., McKee S., Orestano D., Pasqualucci E., Petrucci F., Rauscher F. The ATLAS MDT remote calibration centers // Journal of Physics: Conference Series, 2010. – Vol. 219. – Online Computing. – P. 022028. – Doi: 10.1088/1742-6596/219/2/022028.

- [58] Komarov N.M., Kudryavtsev A.V., Paryshkin Yu.A. Technical solutions for the shutter control system of the first mirror and the remote calibration diagnostic system "active spectroscopy" / Physico-technical intelligent Systems (FTIS-2024). – III Scientific and Practical Conference. – Tambov, 2024. – P. 37. – eLibrary ID: 62679137. – EDN: LOTHJN (in Russian).
- [59] Asadov H.G., Alieva A.D., Gumbatov D.A. Issues of radiometric calibration of remote sensing devices installed on board UAVs // Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies. – 2024. – Vol. 29. – No. 2. – Pp. 41-50. – eLibrary ID: 65640308. – EDN: MOKDGX. – DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-2-41-50 (in Russian).
- [60] Vito S.D., Elia G.D., Ferlito S., Esposito E., Piantadosi G., Francia G.D. Remote Calibration strategies for Low Cost Air Quality Multisensors: a performance comparison / 2024 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN). – Grapevine, USA, 12-15 May 2024. – Pp. 1-4. – Doi: 10.1109/ISOEN61239.2024.10556107.
- [61] Xiujie Y., Yan C., Rong L., Yanling L., Yixi L. Development of a remote calibration system for monitoring ambient temperature and humidity // Chinese Institute of Testing Technology. – Chengdu, Sichuan, China, 610021. – Pp. 186-190. – DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2024.06.029.
- [62] Mellit A., Benhanem M., Herrak O., Messalaoui A. Design of a Novel Remote Monitoring System for Smart Greenhouses Using the Internet of Things and Deep Convolutional Neural Networks // Energies. – 2021. – Vol. 14. – Art. 5045.
- [63] Golovastov A.A. Standard – PXI technology and equipment for control and measuring systems // Modern automation technologies. – 2012. – No. 3. – Pp. 132-138 (in Russian).
- [64] Automation of physical research and experiment: computer measurements and virtual instruments based on LabVIEW 7 / Ed. Butyrin P.A. – Moscow: DMK Press. – 2005. – 264 p. (in Russian).
- [65] GOST R 8.736-2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij (GSI). Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenij. Osnovnye polozheniya. – Moscow: Standartinform. – 2013 (in Russian)
- [66] GOST R 8.879-2014 Gosudarstvennaya sistema obes-pecheniya edinstva izmerenij (GSI). Metodiki kalibrovki sredstv izmerenij. Obshchie trebovaniya k sodержaniyu i izlozheniyu. – Moscow: Standartinform. – 2015 (in Russian).
- [67] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – JCGM, 2008. – 120 p.
- [68] PR 50.2.016-94 GSI. Trebovaniya k vypolneniyu kalibrovchnyh rabot. – Moscow: Gosstandart Rossii. – 1995 (in Russian).
- [69] RD RSK 01-2014 Polozhenie o Rossijskoj sisteme kalibrovki. – Sbornik rukovodyashchih dokumentov Rossijskoj sistemy kalibrovki. – Moscow: ANO «RSK-Konsalting» – 2014 (in Russian).
- [70] RD RSK 02-2014 Poryadok organizacii deyatel'nosti Rossijskoj sistemy kalibrovki // Sbornik rukovodyashchih dokumentov Rossijskoj sistemy kalibrovki. – Moscow: ANO «RSK-Konsalting». – 2014 (in Russian).
- [71] GOST ISO/MEK 17025-2009 Obshchie trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nyh i kalibrovchnyh laboratorij – Standartinform. – 2018 (in Russian).
- [72] GOST ISO/MEK 17025-2019 Obshchie trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nyh i kalibrovchnyh laboratorij. – Standartinform. – 2019 (in Russian).
- [73] Postanovlenie pravitel'stva RF No. 311 of April 2, 2015 "Ob utverzhenii polozheniya o priznanii rezul'tatov kalibrovki pri poverke sredstv izmerenii v sfere gosudarstvennogo regulirovaniya obespecheniya edinstva izmerenii. – Sobranie zakonodatel'stva RF. – 2015. – No. 15. – st. 2272 (in Russian).
- [74] Spoedler H.J.W. Virtual instruments and virtual environments // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 1999. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 14-19.
- [75] Cristaldi L., Ferrero A., Piuri V. Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: What is really useful, innovative, and technically sound // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1999. – Vol. 42. – № 3. – Pp. 20-27.
- [76] De Capua C., Liccardo A., Morello R. On the web service-based remote didactical laboratory: further developments and improvements / Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2005. – Canada, Ottawa, May 16-19, 2005. – Pp. 1692-1696.

### Information about the authors

Oleg V. Stukach is with National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia; Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: [tomsk@ieee.org](mailto:tomsk@ieee.org), ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Ivan A. Ershov is with Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: [ershov@corp.nstu.ru](mailto:ershov@corp.nstu.ru), ORCID: 0000-0003-1524-6508.

# Информационная система подведения итогов успеваемости студентов по итоговым ведомостям

К.А. Будников

*Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия*

**Аннотация** – В статье рассматривается процесс разработки информационной системы для подведения итогов успеваемости студентов по итоговым ведомостям. Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации бизнес-процессов работы деканата в условиях постоянной модернизации рабочих условий в университете. Предложенное решение реализовано на основе технологии WindowsForms для клиента и PostgreSQL - для серверной части. Информационная система обеспечивает автоматизацию ключевых процессов работы деканата при подведении итогов успеваемости: сбор информации в одном источнике, анализ итоговых ведомостей, хранение обработанных ведомостей в базе данных, возможность сравнения нескольких обработанных ведомостей для проведения статистического исследования, предоставление обработанной информации в качестве отчёта руководству университета. Проведённый анализ показал, что разработанная система обладает преимуществами перед существующими аналогами за счёт реализованного функционала, производительности и стоимости внедрения системы.

**Ключевые слова** – электронный деканат, автоматизация бизнес-процессов, обработка итоговых учебных ведомостей, информационная система.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный университет – это огромный механизм, где каждая его часть взаимосвязана. Если одна из частей механизма теряет работоспособность, то страдают и другие элементы системы. Руководство институтов в конце каждого учебного года просит сотрудников деканата подвести итоги обучения студентов различных направлений. В это время деканат нагружен сильнее всего, так как необходимо не только составлять отчёты, но и параллельно работать со студентами, что увеличивает риск возникновения ошибок. Необходимо создать информационную систему, которая снизит нагрузку на сотрудников деканата и повысит их эффективность.

Анализ существующих программных решений, входящих в состав программного обеспечения ИС,

которым пользуется деканат, показал отсутствие необходимого функционала.

Целью данной работы является разработка программного решения для подведения итогов успеваемости студентов Института информационных технологий и коммуникации Астраханского государственного технического университета (АГТУ), обеспечивающего высокую скорость выполнения требуемых функций, а также удобство использования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: анализ предметной области, анализ бизнес-процессов деканата, разработка инфологической модели базы данных.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ключевые должности сотрудников деканата: декан, заместитель декана, методист, секретарь. Основные бизнес-процессы деканата – составление итоговой ведомости учёта успеваемости студентов, анализ итоговых ведомостей в каждой группе, составление резюмирующей таблицы, отчётность.

Анализ бизнес-процессов выявил следующие проблемные зоны:

- отсутствует быстрый доступ к информации;
- использование бумажных носителей для хранения информации;
- ручной труд повышает вероятность возникновения ошибок;
- большая трата времени на выполнение однотипных действий;
- отсутствие единой базы хранения информации.

На основе анализа предметной области сформулированы требования к программному решению. Функциональные требования включают в себя: проведение анализа итоговых ведомостей, хранение информации в базе данных, составление резюмирующей таблицы на основе полученных данных, возможность использования информации о других учебных годах для проведения статистического исследования, возможность получения информации из других программ, используемых деканатом, экспорт

данных из информационной системы в приложения МойОфис, нефункциональные требования: время отклика системы не более двух секунд, защита от несанкционированного доступа.

## II. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ

### A. Выбор технологического стека

Для реализации программного решения выбрана архитектура клиент-сервер с толстым клиентом. Данная архитектура обеспечит разгрузку сервера, что ведёт к быстрому получению информации из базы данных. Программное решение будет реализовано на языке C# с использованием .NET Framework, WindowsForms [1-3].

### B. Инфологическая модель данных

Инфологическая модель базы данных содержит в себе двенадцать таблиц, приведённых к третьей нормальной форме [4]. Ключевыми сущностями являются: успеваемость, дисциплина, учебный план, группа, студент [5-8].

Инфологическая модель (Рис. 1) отражает взаимосвязи между основными сущностями системы.

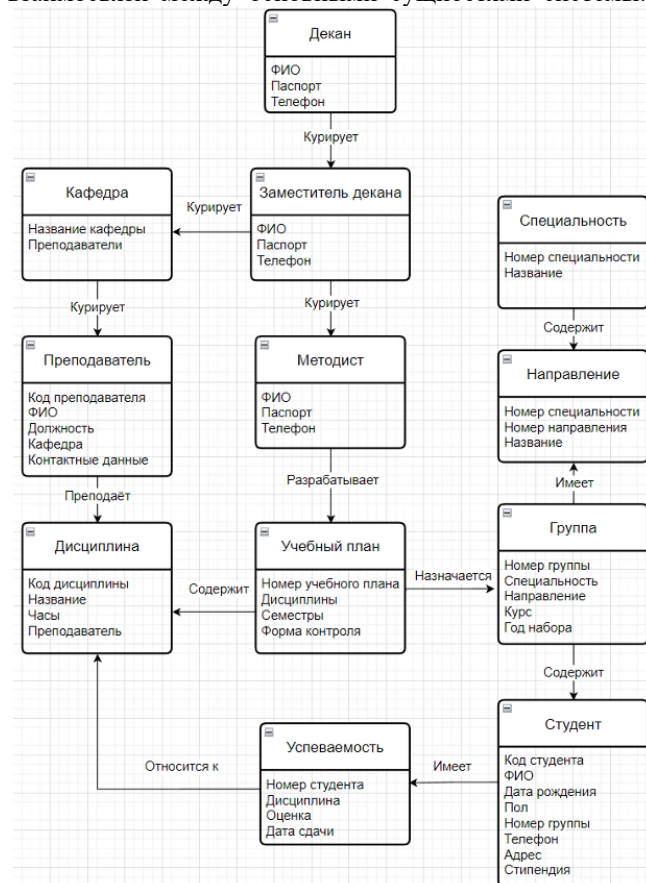


Рис. 1. Инфологическая модель данных системы подведения итогов успеваемости студентов.

### C. Ключевые алгоритмы программного решения

Система реализует следующие ключевые алгоритмы:

1. алгоритм анализа итоговой ведомости;
2. алгоритм генерации таблицы с данными, полученными в результате анализа;
3. алгоритм поиска информации о прошлых учебных годах;
4. алгоритм получения отчётного документа;
5. алгоритм сравнения успеваемости студентов разных годов обучения;
6. алгоритм экспорта таблиц с данными в средства МойОфис.

## III. РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

### A. Функциональные модули системы

Программное решение содержит следующие модули:

- Модуль обработки итоговых ведомостей;
- Модуль генерации таблицы с данными, полученными в результате анализа итоговой ведомости;
- Модуль идентификации и авторизации;
- Модуль отчётности и аналитики.

### B. Производительность и безопасность

Система должна демонстрировать время отклика на действия пользователя менее двух секунд. Необходимо реализовать защиту от несанкционированного доступа с возможностью резервного копирования базы данных через заданное время.

### C. Сравнение с аналогами

Среди доступных программных решений нет таких, которые бы удовлетворяли требованиям заказчика в полной мере, но можно выделить два программных продукта, которые больше всего соответствуют требованиям заказчика: OData service и SOAP.

OData service – это стандартный REST-интерфейс, встроенный в платформу 1С, который позволяет внешним приложениям получать, изменять, создавать и удалять данные в базе 1С через HTTP-запросы, используя открытый протокол OData (Open Data Protocol). Данное программное решение поддерживает операции чтения, создания, изменения и удаления данных. Однако отсутствуют основные функции, которые требует заказчик, также введение OData service не подходит заказчику, так как требуется опубликовать базу данных на веб-сервере, что ведёт к лишней работе [9].

SOAP – технология организации обмена данными между 1С и внешними информационными системами через веб-сервисы на основе протокола SOAP. Широко применяется для интеграции с сервисами и порталами. Через SOAP возможна организация передачи

информации, однако данное программное решение является веб-сервисом и его внедрение и настройка займёт большое количество времени [10].

Проведено сравнение программного решения с существующими аналогами (Табл. I). Разработанное программное решение демонстрирует сочетание функциональности и стоимости.

ТАБЛИЦА I  
СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО РЕШЕНИЯ С  
АНАЛОГАМИ

Критерий/Функция	OData Service	SOAP	Разрабатываемая система
Отчётность	+	+	+
Анализ итоговых ведомостей по каждой группе	-	-	+
Составление резюмирующей таблицы	-	-	+
Учёт прошлых учебных годов	-	-	+
Возможность поиска информации об успеваемости студентов разных годов обучения	-	-	+
Возможность сравнения успеваемости студентов разных годов обучения	-	-	+

Сравнительная таблица демонстрирует у существующих аналогов отсутствие необходимых сотрудникам деканата функций, обеспечивающих быстроту и эффективность выполнения порученных им заданий. Разрабатываемая система будет реализовывать, отсутствующий у аналогов функционал.

#### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программное решение находится в процессе разработки, его основные преимущества заключаются в централизованном хранилище данных, автоматической генерации документов для предоставления в отчёте, возможность использования данных о прошлых учебных годах для проведения статистических исследований.

При использовании системы ожидается, что время анализа итоговых ведомостей значительно сократится, также как и количество совершаемых ошибок, ожидается повышение производительности сотрудников деканата.

После успешного завершения процесса разработки программное решение может быть успешно внедрено в деканат Института информационных технологий и коммуникации АГТУ для увеличения эффективности работы сотрудников, а также для снижения нагрузки.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Joseph Albahari. C# 9.0 in a Nutshell: The Definitive Reference / Joseph Albahari, Ben Albahari, O'Reilly Media; 1st edition, 2021, pp. 1058.
- [2] Марк Прайс. C# 8 и .Net Core. Разработка и оптимизация - Питер, 2021, 816 с..
- [3] Brown E. Windows Forms in Action. – Dreamtech Press, 2006.
- [4] Hans-Jurgen Schonig. Mastering PostgreSQL 13 / Hans-Jurgen Schonig - Packt Publishing, 2020 – pp. 476.
- [5] Edward R. Tufte. The Visual Display of Quantitative Information / Edward R. Tufte - Graphics Pr; 2nd edition; 2014, pp. 197.
- [6] Graeme Simsion. Data Modeling Essentials: A Comprehensive Guide to Data Modeling for the Business Analyst and Data Modeler / Graeme Simsion, Janis Sims - Morgan Kaufmann; 3rd edition; 2004, pp. 560.
- [7] Steve Hoberman. Data Modeling Made Simple A Practical Guide for Business and IT Professionals / Steve Hoberman - Technics Publications; 2nd edition, 2015, pp. 246.
- [8] Никлаус В. Алгоритмы и структуры данных. – Литрес, 2022, 274 с..
- [9] Работа с данными приложения в сервисе 1С:Фреш через стандартный интерфейс OData[Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://1cfresh.com/articles/data\\_odata?ysclid=mig1knbv5e396297114](https://1cfresh.com/articles/data_odata?ysclid=mig1knbv5e396297114), свободный (дата обращения: 15.11.2025).
- [10] API для обслуживающих организаций [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://its.1c.ru/db/freshsd#content:48727915:hdoc>, свободный (дата обращения: 15.11.2025).

#### Информация об авторах

Будников Кирилл Андреевич, студент группы ДИНРБ-41 Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [kirillbud04@mail.ru](mailto:kirillbud04@mail.ru)

Information system for analyzing the academic performance of students based on final grades

Kirill Budnikov

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Abstract** — The article examines the process of developing an information system for summarizing student academic performance based on final grade sheets. The relevance of the work is determined by the need to optimize the business processes of the dean's office amid continuous modernization of working conditions at the university. The proposed solution is implemented using WindowsForms technology for the client side and PostgreSQL for the server

side. The information system automates key processes of the dean's office in summarizing academic results: consolidating information into a single source, analyzing final grade sheets, storing processed grade sheets in a database, enabling comparison of multiple processed grade sheets for statistical analysis, and providing processed information as reports to university administration. The conducted analysis demonstrated that the developed system offers advantages over existing counterparts due to its implemented functionality, performance, and cost of deployment.

**Keywords** — dean's office operations, business process automation, processing of final academic records, information system

## REFERENCES

- [1] Joseph Albahari. C# 9.0 in a Nutshell: The Definitive Reference / Joseph Albahari, Ben Albahari, O'Reilly Media; 1st edition, 2021, pp. 1058.
- [2] Mark Prajs. C# 8 i .Net Core. Razrabotka i optimizaciya - Piter, 2021, 816 s..
- [3] Brown E. Windows Forms in Action. – Dreamtech Press, 2006
- [4] Hans-Jurgen Schonig. Mastering PostgreSQL 13 / Hans-Jurgen Schonig - Packt Publishing, 2020 – pp. 476.
- [5] Edward R. Tufte. The Visual Display of Quantitative Information / Edward R. Tufte - Graphics Pr; 2nd edition; 2014, pp. 197..
- [6] Graeme Simson. Data Modeling Essentials: A Comprehensive Guide to Data Modeling for the Buisness Analyst and Data Modeler / Graeme Simson, Janis Sims - Morgan Kaufmann; 3rd edition; 2004, pp. 560.
- [7] Steve Hoberman. Data Modeling Made Simple A Practical Guide for Buisness and IT Professionals / Steve Hoberman - Technics Publications; 2nd edition, 2015, pp. 246.
- [8] Niklaus V. Algoritmy i struktury dannyh. – Litres, 2022, 274 s..
- [9] Rabota s dannymi prilozheniya v servise 1S:Fresh cherez standartnyj interfejs OData[Online]. Available: [https://1cfresh.com/articles/data\\_odata?ysclid=mig1knbv5e396297114](https://1cfresh.com/articles/data_odata?ysclid=mig1knbv5e396297114) (15.11.2025).
- [10] API dlya obsluzhivayushchih organizacij [Online]. Available: <https://its.1c.ru/db/freshsd#content:48727915:hdoc> (15.11.2025).

## Information about author

Budnikov Kirill Andreevich, a student of Astrakhan state technical university, Astrakhan, Russian Federation, [kirillbud04@mail.ru](mailto:kirillbud04@mail.ru)

# Автоматизация пропускного режима автотранспорта на территорию кампуса Астраханского государственного технического университета

Д.Д. Яхьяев, Н.Д. Куркурин, И.Ю. Кучин, Ш.Ш. Иксанов

*Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия*

**Аннотация** – В статье рассматривается проблема автоматизации пропуска автотранспорта на территорию кампуса Астраханского государственного технического университета. Существующая практика, основанная на телефонных согласованиях и бумажных журналах, приводит к образованию очередей на контрольно-пропускных пунктах (КПП), ошибкам в учёте и сложностям при анализе данных. В качестве решения предлагается внедрение веб-ориентированной системы управления пропускным режимом автотранспорта. Система строится на централизованной базе данных и использует роль-ориентированную модель с тремя основными ролями: администратор, оператор и охранник. Оператор вносит данные об автомобилях и правах доступа, охранник на КПП проверяет разрешение по госномеру, администратор управляет пользователями и настройками. Техническая реализация основана на стеке технологий C#, архитектуре MVC, фреймворке Entity Framework Core и СУБД PostgreSQL. В статье определены ключевые требования к системе и критерии её оценки. Ожидается, что внедрение позволит ускорить процесс пропуска, повысить точность учёта, усилить контроль и создать основу для интеграции с другими сервисами университета.

**Ключевые слова** – пропускной режим, система контроля доступа, веб-приложение, база данных, пропуск автотранспорта, C#, MVC, PostgreSQL.

## ВВЕДЕНИЕ

### *А. Актуальность и постановка проблемы*

Организация эффективного пропускного режима для автотранспорта – это важная задача для современного университетского кампуса. Поток служебных, личных и гостевых автомобилей требует не только учёта, но и обеспечения безопасности, прозрачности и управляемости процессов въезда и выезда. Ручные методы фиксации информации (телефонные звонки, бумажные журналы) часто становятся причиной ошибок, задержек и усложняют последующий контроль.

В кампусе Астраханского государственного технического университета (АГТУ) пропуск автотранспорта до сих пор организован вручную. Оператор передаёт данные об автомобилях охране по телефону (сотрудники контрольно-пропускных пунктов (КПП) фиксируют информацию в бумажных журналах), либо через предварительно поданную служебную записку на имя профильного проректора. Такой подход затрудняет быстрый поиск сведений, не позволяет оперативно анализировать статистику, слабо контролирует соблюдение правил доступа и регулярно приводит к образованию очередей на въезде.

В условиях цифровизации управления и развития IT-инфраструктуры вуза необходим переход от ручных процедур к централизованной автоматизированной системе. Это повысит уровень безопасности, снизит влияние человеческого фактора и позволит гибко настраивать правила доступа.

### *В. Анализ существующих решений и их ограничения*

Для организации пропускного режима автотранспорта на охраняемых объектах широко применяются готовые системы контроля и управления доступом (СКУД) [1, 2]. На российском рынке представлен ряд известных отечественных решений, таких как Gate компании «Равелин», Parsec компании «Релвест», интегрированная система безопасности «Орион» фирмы «Болид», системы PERCo-Web, Sigur, RusGuard и другие [3]. Обзоры и рейтинги СКУД показывают, что эти комплексы ориентированы на построение полноценных систем безопасности предприятий и инфраструктурных объектов, часто в сочетании с охранной и пожарной сигнализацией, видеонаблюдением и другими подсистемами [4].

К примеру, система PERCo-Web поддерживает контроль доступа, учёт рабочего времени, интеграцию с видеонаблюдением и может масштабироваться от небольшого офиса до крупного распределенного предприятия. Sigur позиционируется как универсальная платформа для объектов любого масштаба и позволяет

организовать гибкий контроль доступа как для персонала, так и для автотранспорта, включая распределённую сеть контроллеров, способных принимать решения локально. Интегрированная система «Орион» (Болид) ориентирована на комплексную безопасность: в её рамках в единую архитектуру объединяются контроль доступа, охранная и пожарная сигнализация, видеонаблюдение и управление инженерными системами здания.

Опыт эксплуатации таких систем показывает, что их сильной стороной является богатый функционал, наличие готовых интеграций с оборудованием и возможность построения единой системы безопасности для крупных объектов. Однако в контексте университетского кампуса эти преимущества не всегда реализуются полностью. Для АГТУ избыточной оказывается глубина интеграции с внешними подсистемами, функционал учёта рабочего времени, развитые сценарии взаимодействия с промышленным оборудованием. При этом стоимость лицензий, сложность внедрения и необходимость специализированного проектирования и обслуживания создают существенную нагрузку на бюджет и ИТ-службы.

Общими ограничениями перечисленных решений для задачи кампуса АГТУ являются недостаточная гибкость настройки бизнес-логики под реальные обязанности оператора, охраны и администрации, зависимость от поставщика при доработке функционала и изменении правил доступа, а также нерациональное соотношение стоимости и функциональных возможностей для масштаба и потребностей конкретного университета. Эти факторы делают целесообразной разработку собственной специализированной системы, ориентированной именно на сценарии работы АГТУ, а не на усреднённый промышленный объект.

#### *C. Предлагаемое решение и его преимущества*

В данной работе предлагается специализированная веб-система управления пропуском автотранспорта для кампуса АГТУ. В её основе лежит роль-ориентированная модель доступа с тремя ключевыми ролями: администратор, оператор и охранник. Оператор регистрирует транспортные средства в базе, задаёт им статус доступа «разрешён» или «запрещён» и, при необходимости, ограничивает действие разрешения по времени. Охранник на КПП работает с простой веб-страницей: вводит государственный номер автомобиля и получает однозначный результат проверки, сопровождаемый краткой информацией о транспортном средстве и его правах доступа. Администратор отвечает за создание и сопровождение учётных записей пользователей, назначение ролей, ведение справочников и базовых настроек системы.

Отличие предлагаемого решения от типовых коммерческих СКУД состоит в том, что логика работы

сразу проектируется под реальные регламенты АГТУ. Структура справочников, роли пользователей и сценарии взаимодействия формируются исходя из того, как фактически организован пропускной режим в университете, а не подстраиваются под типовую схему, заложенную производителем. Система изначально создаётся как часть информационной инфраструктуры АГТУ на основе веб-технологий и реляционной базы данных, поэтому её проще интегрировать с существующими сервисами вуза. При этом исходный код и модель данных остаются под контролем университета, что даёт возможность развивать и модифицировать систему собственными силами без жёсткой привязки к конкретному поставщику оборудования или программного обеспечения. В функциональном плане реализуется именно тот минимально необходимый набор возможностей, который решает задачу управления въездом автотранспорта в кампусе, без избыточных модулей и платных опций, характерных для крупных мультисервисных комплексов.

Технически система реализуется как веб-приложение с использованием C#, архитектуры MVC, фреймворка Entity Framework Core и СУБД PostgreSQL, что обеспечивает масштабируемость решения, надёжность хранения данных и доступность современных инструментов разработки [5–8].

#### *D. Цель и задачи исследования*

Целью работы является разработка автоматизированной веб-системы управления пропускным режимом для кампуса АГТУ, которая сократит время обработки запросов на въезд, повысит безопасность и удобство работы, а также обеспечит централизованный учёт и анализ перемещений транспорта.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Проанализировать текущую схему организации пропускного режима автотранспорта в АГТУ.
- Сформулировать функциональные и нефункциональные требования к системе.
- Разработать архитектуру веб-приложения и модель данных для хранения информации о транспорте, пользователях и событиях пропуска.
- Реализовать прототип системы с поддержкой ролей администратора, оператора и охранника на технологическом стеке C#, MVC, EF Core и PostgreSQL.
- Провести тестирование прототипа на сценариях, близких к реальным, и оценить результаты по заданным критериям.

### *Е. Значимость результатов*

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная система позволяет заменить существующую ручную схему пропуска автотранспорта на формализованный и управляемый процесс, встроенный в информационную среду АГТУ.

Реализация системы обеспечивает:

- Сокращение времени обслуживания одного автомобиля на КПП за счёт автоматизированной проверки прав доступа и отказа от поиска информации в бумажных журналах.
- Уменьшение количества ошибок, связанных с человеческим фактором (неполный или некорректный учёт, потеря записей).
- Усиление контроля за соблюдением правил доступа.

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основным целеполаганием является создание масштабируемой и надёжной системы для управления пропуском автотранспорта в кампусе АГТУ, которая обеспечит эффективный учёт транспорта, оперативную проверку прав доступа и ведение журнала событий.

### *А. Функциональные требования*

К разрабатываемой информационной системе предъявляются следующие функциональные требования:

- Учёт транспортных средств – хранение данных о транспортных средствах (ТС) (госномер, марка, модель, тип, принадлежность, владелец, подразделение и др.).
- Управление правами доступа – назначение для каждого ТС статуса «разрешен»-«запрещен» въезд на территорию кампуса.
- Поддержка ролей пользователей. Роль администратора – управление учётными записями пользователей системы, назначение ролей, настройка общесистемных параметров. Роль оператора – ввод и актуализация информации о ТС и их правах доступа. Роль охранника – выполнение проверки права въезда по государственному номеру, просмотр краткой информации о ТС и фиксация события въезда-выезда.
- Проверка прав доступа на КПП – ввод госномера ТС через веб-интерфейс, вывод результата проверки (доступ разрешён-запрещён) и кратких сведений о транспортном средстве, регистрация события в журнале (дата, время, КПП, пользователь, результат проверки).
- Администрирование и конфигурирование – управление справочниками (подразделения, типы ТС).

### *В. Нефункциональные требования*

Для обеспечения практической применимости и удобства эксплуатации система должна удовлетворять следующим нефункциональным требованиям:

**Производительность:** время ответа на стандартный запрос проверки права въезда (по госномеру ТС) не должно превышать 1–2 секунд при типовой нагрузке, операции регистрации и обновления данных должны выполняться без заметных задержек для пользователя.

**Доступность:** уровень доступности системы должен составлять не менее 95 % в год, отказ отдельных компонент не должен приводить к потере уже накопленных данных.

**Надёжность:** система должна быть отказоустойчивой и корректно работать в условиях возможных сбоев.

**Безопасность:** реализованные механизмы должны обеспечивать конфиденциальность и целостность хранимых данных.

## II. АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОПУСКНОГО РЕЖИМА АГТУ

### *А. Действующая схема пропуска автотранспорта*

До внедрения автоматизированной системы пропуск автотранспорта на территорию кампуса АГТУ осуществлялся по следующей схеме. Основанием для выдачи разрешения служат служебные записки или иные внутренние документы, оформляемые подразделениями университета. После согласования такие документы передаются ответственному оператору, который ведёт перечень транспортных средств, имеющих право въезда на территорию кампуса.

Информация о конкретных автомобилях (госномер, владелец, подразделение, срок и условия действия разрешения) передаётся оператором сотрудникам контрольно-пропускного пункта по телефону либо в виде отдельных списков. Непосредственно на КПП учёт въездов и выездов ведётся в бумажных журналах: охранник вручную фиксирует дату, время, номер автомобиля и краткие комментарии. Для оперативной проверки прав доступа охранник ориентируется либо на память, либо на распечатанные списки, либо на записи в журнале, что при интенсивном потоке ТС объективно затруднительно.

### *В. Информационные потоки и выявленные проблемы*

Проведённый анализ показывает, что информация о пропускном режиме распределена между несколькими разрозненными носителями. Служебные записки хранятся в бумажном виде или как отдельные файлы, не связанные формально с конкретными записями в перечне транспортных средств. Сведения о том, кому и на какой срок разрешён въезд, частично оказываются у оператора, а частично – у охраны, которая опирается на

собственные записи и устные указания. Фактические въезды и выезды фиксируются только в журналах на КПП и никак не синхронизируются с исходными документами-основаниями.

Такое устройство информационных потоков приводит к тому, что в любой момент времени сложно однозначно ответить, имеет ли конкретный автомобиль актуальное разрешение и на каких условиях оно действует. Различные списки и журналы могут расходиться между собой, устаревшие разрешения не всегда своевременно отменяются, а история изменений прав доступа по конкретному номеру восстанавливается только вручную. Отсутствие формальной связи между служебной запиской и соответствующей записью о разрешении затрудняет проверки и разбор спорных ситуаций: нужно искать документы в архиве и сопоставлять их с журналами КПП.

С учётом этих проблем становится очевидной необходимость перехода к системе, в которой документы-основания, сведения о транспортных средствах, права доступа и фактические события пропуска объединены в единую информационную модель [4].

### III. АРХИТЕКТУРА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ И МОДЕЛЬ ДАННЫХ

#### A. Общая архитектура приложения

Разрабатываемая система реализована как веб-приложение на платформе ASP.NET Core с использованием технологии Razor Pages. В архитектуре приложения выделяются следующие уровни:

- Представление (UI) – Razor-страницы для трёх основных ролей: администратора, оператора и охранника.
- Служебный (сервисный) слой – классы VehicleService, PermissionService, BanService, инкапсулирующие бизнес-логику работы с транспортными средствами, разрешениями и запретами.
- Уровень доступа к данным – контекст DiplomContext на основе Entity Framework Core, обеспечивающий объектно-реляционное отображение на таблицы базы данных PostgreSQL [5, 6].

Взаимодействие с пользователем организовано через стандартную схему HTTP-запросов, обработку Razor-страниц и обращение к сервисам, которые, в свою очередь, работают с БД через EF Core.

#### B. Разграничение доступа и роли пользователей

Роль-ориентированная модель доступа реализована через таблицы User и Role в базе данных, механизм аутентификации на основе cookie и набор политик авторизации, ограничивающих доступ к отдельным

разделам приложения. Для системы определены три основных роли. Администратор отвечает за управление пользователями и их ролями, настройку общесистемных параметров, а также имеет доступ к отчётности и журналу действий. Оператор работает со справочником транспортных средств, вносит и актуализирует данные по автомобилям, оформляет разрешения и запреты на въезд. Охранник использует только те функции, которые необходимы для проверки права въезда по госномеру и просмотра кратких сведений о транспортном средстве. Логическое разделение интерфейса поддерживается за счёт разнесения страниц по каталогам /Admin, /Operator и /Guard; при обращении к каждому из этих разделов система проверяет права пользователя и блокирует доступ тем, чья роль не соответствует требуемой (Рис. 1).

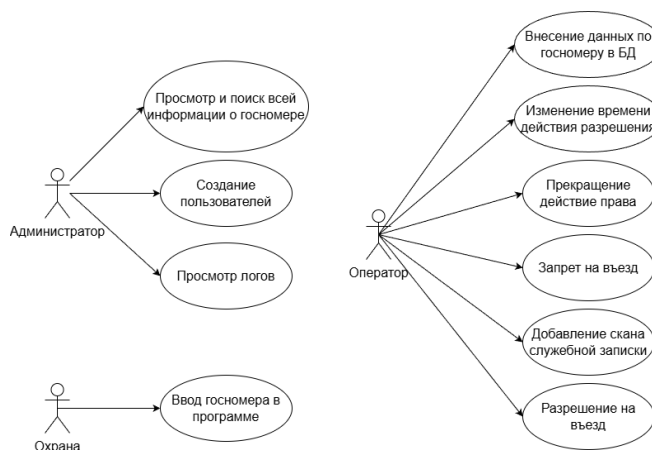


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования

#### C. Модель данных

Модель данных отражает предметную область пропускного режима и включает следующие основные сущности (Рис. 2):

- Vehicle – ТС (госномер, признак иностранного номера, регион, тип, марка, цвет, владелец-описание, дата добавления, пользователь-создатель). Для обеспечения уникальности используется индекс по сочетанию госномера и региона, а связи с таблицами типов и марок реализованы через VehicleType и VehicleBrand.
- Permission – разрешение на въезд. Содержит ссылки на Vehicle, тип разрешения (PermissionType: постоянное, временное, выборочное), дату начала и окончания действия, режим по времени (TimeMode: рабочее время, конкретные часы, любые часы), дополнительные параметры (список дней недели, конкретный день месяца, временной интервал), признак активности, а также ссылку на пользователя, оформившего разрешение, и документ-основание.
- Ban – запрет (блокировка) на въезд. Содержит ссылки на Vehicle, тип запрета (BanType: постоянный,

временный), причину, период действия, признак активности и пользователя, создавшего запись. Наличие активного запрета имеет приоритет над разрешениями при проверке права въезда.

- Document и DocumentVehicle – электронные документы-основания и их связь с транспортными средствами. Document хранит путь к загруженному файлу, описание, пользователя-загрузчика и дату добавления. Связующая таблица DocumentVehicle позволяет привязать один документ к нескольким транспортным средствам, что отражает практику, когда одна служебная записка оформляет пропуск сразу для группы автомобилей.

- ActionLog – журнал действий. В таблице фиксируются операции пользователей (тип действия ActionType: добавление, изменение, удаление, активация, деактивация), объект действия (ObjectType: разрешение или запрет), ссылки на связанные сущности (Vehicle, Permission, Van), комментарий и момент времени. Это обеспечивает трассируемость изменений и возможность последующего анализа.

- Справочники (VehicleType, VehicleBrand) – списки типов и марок ТС, используемые для унификации ввода и построения отчётности

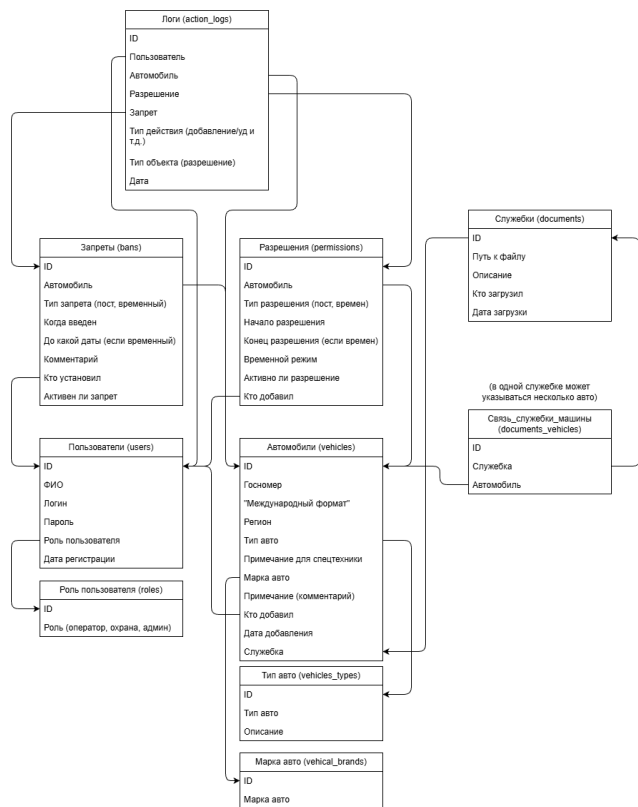


Рис. 2. ER-диаграмма

Перечислимые типы (разновидности разрешений, режимы времени, типы запретов и действий) сопоставлены с enum-типами PostgreSQL через атрибуты PgName, что упрощает поддержку

целостности на уровне БД и обеспечивает единообразное отображение значений в интерфейсе.

#### D. Логика проверки права въезда

Ключевым элементом бизнес-логики является проверка права въезда по введённому госномеру. Алгоритм работы реализован в сервисах и включает следующие шаги:

1. Нормализация введённого номера (учёт пробелов, регистра, различий между российскими и иностранными номерами).

2. Поиск записи о ТС в таблице Vehicles по номеру и региону (для российских номеров) либо только по номеру (для иностранных).

3. Проверка наличия активных записей в таблице Bans. При наличии действующего запрета въезд однозначно запрещается.

4. Поиск активных разрешений в таблице Permissions и проверка их применимости к текущему моменту времени.

- 4.1. Дата входит в интервал действия разрешения.

- 4.2. Выполняются условия по режиму времени (рабочие часы, конкретные часы, выбранные дни недели, день месяца).

- 4.3. Разрешение имеет признак активности

5. Формирование результата проверки (разрешён-запрещён), вывод краткой информации о ТС и, при необходимости, сопутствующих комментариев (наличие документа-основания и др.)

Результаты проверки фиксируются в журнале ActionLog, что позволяет администраторам анализировать историю обращений и выявлять спорные ситуации.

## IV. ПРОТОТИП СИСТЕМЫ С ПОДДЕРЖКОЙ РОЛЕЙ АДМИНИСТРАТОРА, ОПЕРАТОРА И ОХРАННИКА

### A. Интерфейс и сценарии работы охранника

Для охранника разработан отдельный раздел приложения, доступ к которому получают только пользователи с соответствующей ролью. Основной инструмент его работы – страница «Проверка ТС». На ней размещено поле для ввода госномера с возможностью указать регион и отметить, что номер относится к иностранному формату, а также кнопка запуска проверки и область, где отображается результат. После ввода номера и отправки формы система возвращает однозначный ответ о том, разрешён или запрещён въезд, и одновременно показывает базовую информацию о ТС: тип, марку, цвет. Если для этого номера существуют активные разрешения или запреты, охранник видит краткую сводку по ним. При наличии связанной служебной

записки он может ознакомиться со сканом документа (Рис. 3).

Интерфейс спроектирован таким образом, чтобы минимизировать число действий охранника: одна форма ввода, одна кнопка, результат – в явном виде.

## Проверка ТС (охрана)

Госномер

Допустимые буквы: А,В,Е,К,М,Н,О,Р,С,Т,У,Х

Регион

Иностраннй номер

---

**Результат проверки ТС**

**K222PA / 30**

**Тип ТС** не задан

**Бренд** не задан

**Цвет** не указан

**Комментарий по типу** нет

**Примечание** нет

**Служебная записка** [Открыть служебную записку](#)

**Въезд разрешён** Постоянный В любое время

**Начало:** 12.12.2025 **Окончание:** — (бессрочно)

График: каждый день, круглосуточно

Рис. 3. Интерфейс страницы охранника

### В. Интерфейс оператора: регистрация ТС и управление доступом

Оператор работает в административном разделе, предназначенном для ведения справочников и управления правами доступа. В его распоряжении находится список ТС с поиском по госномеру и фильтрами по типу, марке и принадлежности (Рис. 4). Через соответствующие формы оператор добавляет новые записки (Рис. 5), изменяет уже существующие и при необходимости помечает их как неактуальные. Назначение разрешений на въезд также выполняется в интерфейсе оператора: он выбирает нужный автомобиль, задаёт тип разрешения, указывает даты начала и окончания действия, настраивает режим по времени (круглосуточно, только рабочие часы или

отдельные интервалы) и при необходимости привязывает служебную записку (Рис.6).

Оформление запретов на въезд реализовано по схожей схеме. Оператор либо находит уже существующее ТС и устанавливает для него запрет с поясняющим комментарием (Рис.7).

Номер	Регион	Бренд	Тип	Статус	Детали	Действия
E11EE	30	—	—	Запрет	Активно Постоянный Причина: Оперативный запрет Период: —	<input type="button" value="Изменить"/> <input type="button" value="Удалить"/>
M11MM	30	—	—	Разрешение	Активно Выборочно Режим: В любое время Период: —	<input type="button" value="Изменить"/> <input type="button" value="Удалить"/>
U11UA	30	Lada	автобус	Запрет	Активно Постоянный Причина: Оперативный запрет Период: —	<input type="button" value="Изменить"/> <input type="button" value="Удалить"/>
E12ZU	30	BMW	автобус	Запрет	Активно Постоянный Причина: Оперативный запрет Период: —	<input type="button" value="Изменить"/> <input type="button" value="Удалить"/>

Рис. 4. Список транспортных средств

## Добавление

Добавить новое ТС

Госномер

Допустимые буквы: А,В,Е,К,М,Н,О,Р,С,Т,У,Х

Регион

Иностраннй номер

Тип ТС

Марка

Цвет

Рис. 5. Форма добавления нового ТС

### Сохранить разрешение

Тип разрешения

Выборочно

Дата начала

Дата окончания (не используется)

Режим дней

Время (опционально)

Оставьте пустым, если разрешение действует круглосуточно.

Дни недели

Пн  Вт  Ср  Чт

Пт  Сб  Вс

Используется, если выбран режим «По дням недели».

День месяца

Используется, если выбран режим «По дню месяца».

Служебная записка (файл, опционально)

Выберите файл

Уже прикреплена служебная записка. [Открыть](#)

Загрузите новый файл, чтобы заменить.

Удалить текущую служебную записку

Активно

Рис. 6. Форма назначения и изменения разрешений на въезд

### Сохранить запрет

Тип запрета

Дата начала

Дата окончания (не нужна)

Причина

Активно

Рис. 7. Форма оформления и управления запретами

Для уменьшения количества ошибок применяются проверки на стороне сервера и клиента. В частности, используется индивидуально разработанный атрибут валидации госномера, а при вводе данных о ТС и разрешениях контролируется корректность обязательных полей.

### С. Интерфейс администратора: пользователи и отчётность

Администратор системы использует раздел, в котором сосредоточены средства управления пользователями и средствами контроля. В данном разделе он изменяет данные пользователей (Рис. 8), создаёт новые учётные записи, указывает для них ФИО, логины, роли и начальные пароли (Рис. 9) при необходимости.

В этом же разделе администратор получает доступ к журналу действий (Рис. 10). Записи журнала можно отфильтровать по пользователю, периоду времени, типу операции и объекту (разрешение, запрет, транспортное средство). Благодаря этому администратор может, например, вывести список всех изменений разрешений за определённый месяц или посмотреть, какие проверки выполнял конкретный сотрудник охраны.

Перечисленные функции позволяют связать формальные полномочия пользователей с фактической историей их действий и использовать собранные данные для контроля и оптимизации работы пропускного режима.

Список пользователей

ФИО	Логин	Роль	Создан			
Администратор Данис	admin	admin	30.10.2025 20:39	<input type="button" value="Изменить"/>	<input type="button" value="Сброс пароля"/>	<input type="button" value="Удалить"/>
Оператор Данис	operator	operator	30.10.2025 20:39	<input type="button" value="Изменить"/>	<input type="button" value="Сброс пароля"/>	<input type="button" value="Удалить"/>
Охрана Данис	guard	guard	30.10.2025 20:39	<input type="button" value="Изменить"/>	<input type="button" value="Сброс пароля"/>	<input type="button" value="Удалить"/>

Рис. 8. Список пользователей в системе

### Добавить пользователя

ФИО

Логин

Роль

Пароль

Для нового пользователя пароль обязателен. При редактировании оставьте пустым, чтобы не менять.

Подтверждение пароля

Рис. 9. Форма добавления пользователя

## Отчёты

Фильтры

Число  
— Все числа — ▾

Пользователь:  Год:  Месяц:

Если месяц не выбран — фильтр по числу игнорируется.

Логи действий Найдено: 232

Дата	Пользователь	Действие	Объект	ТС	Комментарий
26.11.2025 10:05	Оператор Данис (operator)	Добавление	Разрешение	M111MM 30	—
25.11.2025 19:10	Оператор Данис (operator)	Деактивация	Разрешение	A777AA 30	—
25.11.2025 19:10	Оператор Данис (operator)	Деактивация	Разрешение	E257KY 30	—
25.11.2025 16:42	Оператор Данис (operator)	Добавление	Разрешение	A777AA 30	—
25.11.2025 16:35	Оператор Данис (operator)	Добавление	Разрешение	E257KY 30	—

Рис. 10. Журнал действий

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён анализ действующей организации пропускного режима автотранспорта на территорию кампуса АГТУ. Показано, что существующая схема, основанная на телефонных согласованиях и ведении бумажных журналов на КПП, приводит к фрагментации данных, повышенной вероятности ошибок, затрудняет проверку актуальности разрешений и получение статистики по движениям транспортных средств. На основе анализа были сформулированы требования к автоматизации, включающие централизованный учёт транспортных средств, явное представление разрешений и запретов, привязку документов-оснований и обязательное ведение журнала действий пользователей.

С учётом этих требований разработана архитектура веб-приложения на платформе ASP.NET Core с использованием Razor Pages, Entity Framework Core и СУБД PostgreSQL. Предложена модель данных, включающая сущности для транспортных средств, разрешений, запретов, документов-оснований и журнала действий, а также набор справочников и перечислимых типов, отражающих специфику работы пропускного режима в АГТУ. Реализована роль-ориентированная модель доступа с тремя ролями (администратор, оператор, охранник), обеспечивающая разделение интерфейсов и полномочий в соответствии с реальными функциями пользователей.

На основе спроектированной архитектуры создан прототип системы. Реализованы ключевые сценарии: регистрация транспортных средств и документов-оснований, назначение и отзыв разрешений, оформление запретов, проверка права въезда по

госномеру, журналирование действий. Таким образом поставленные в работе цели и задачи по автоматизации пропускного режима автотранспорта в кампусе АГТУ достигнуты

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ворона В.А., Тихонов В.А. *Системы контроля и управления доступом*. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 272 с.
- [2] ГОСТ Р 51241–98. Средства и системы контроля и управления доступом. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний.
- [3] Рейтинг самых надёжных СКУД отечественных производителей // Системы безопасности. – 2021. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/rejting-samyh-nadezhnyh-skud-otechestvennyh-proizvoditelej>
- [4] Организация системы контроля доступа на предприятии // Современная электроника и технологии автоматизации. – 01.03.2018. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/otrasli/bezopasnost/124423/>
- [5] Умрихин Е. *Разработка веб-приложений с помощью ASP.NET Core MVC*. – Изд-во: БХВ, 2023. – 416 с.
- [6] Учебная серия ASP.NET Core MVC с EF Core. Документация Microsoft Learn. – 2025. – [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/data/ef-mvc/>
- [7] Соковых П. Меняем схему базы данных в PostgreSQL, не останавливая работу приложения // Tproger. – 2019. – [Электронный ресурс]. URL: <https://tproger.ru/translations/postgres-ddl-without-downtime>
- [8] PostgreSQL: Непрерывное архивирование и восстановление на момент времени (Point-in-Time Recovery, PITR) // Документация PostgreSQL. – [Электронный ресурс]. URL: <https://postgrespro.ru/docs/postgresql/current/continuous-archiving>

## Информация об авторах

Хьяев Данис Дамирович, студент Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [danis.004@mail.ru](mailto:danis.004@mail.ru)

Куркурин Николай Дмитриевич, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [kurkurinn@mail.ru](mailto:kurkurinn@mail.ru)

Кучин Иван Юрьевич – к.т.н, доцент кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [kuchin@astu.ru](mailto:kuchin@astu.ru)

Иксанов Шамиль Шавкетович – доцент кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [sh.iksanov@astu.ru](mailto:sh.iksanov@astu.ru)

## Automation of vehicle access to the Astrakhan State Technical University campus

Danis Yahyaev, Nikolay Kurkurin, Ivan Kuchin,  
Shamil Iksanov

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Abstract** – The article discusses the permit automation of vehicles to Astrakhan State Technical University (ASTU) campus. The current practice based on telephone approvals and paper logs, leads to queues at checkpoints, accounting errors, and difficulties in data analysis. The implementation of a web-based access control system is proposed as a solution. The designed system is performed on a centralized database and uses a role-oriented model with three main roles: administrator, operator and security guard. The operator enters information about cars and access rights, the guard at the checkpoint checks the permission according to the license plate, the administrator manages users, and settings. The technical implementation is based on the C# technology stack, the MVC architecture, the Entity Framework Core framework, and the PostgreSQL database control system. The article defines the key requirements for the system and the criteria for its evaluation. It is expected that the implementation will speed up the admission process, improve accounting accuracy, strengthen control and create the basis for integration with other university services.

**Keywords** – throughput mode, access control system, web application, database (DB), C#, MVC, PostgreSQL.

## Information about the authors

Danis Damirovich Yahyaev, student of the Institute of Information Technology and Communications of the Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [danis.004@mail.ru](mailto:danis.004@mail.ru)

Nikolay Dmitrievich Kurkurin, Senior Lecturer, Department of Automated Systems of Information Processing and Control, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [kurkurinn@mail.ru](mailto:kurkurinn@mail.ru)

Ivan Yuryevich Kuchin – PhD, Associate Professor, Department of Information Security, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [kuchin@astu.ru](mailto:kuchin@astu.ru)

Iksanov Shamil Shavketovich – Associate Professor of the Department of Information Security at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [sh.iksanov@astu.ru](mailto:sh.iksanov@astu.ru)

## REFERENCES

- [1] Vorona V.A., Tikhonov V.A. Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. – M.: Goryachaya liniya–Telekom, 2013. – 272 s.
- [2] GOST R 51241–98. Sredstva i sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. Klassifikatsiya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy.
- [3] Rejting samykh nadyozhnykh SKUD otechestvennykh proizvoditelej // Sistemy bezopasnosti. – 2021. – <https://www.secuteck.ru/articles/rejting-samyh-nadezhnyh-skud-otechestvennyh-proizvoditelej>.
- [4] Organizatsiya sistemy kontrolya dostupa na predpriyatii // Sovremennaya elektronika i tekhnologii avtomatizatsii. – 01.03.2018. – <https://www.cta.ru/articles/cta/otrasli/bezopasnost/124423/>.
- [5] Umrikhin E. Razrabotka veb-prilozhenij s pomoshchyu ASP.NET Core MVC. – Publ.: BKhV, 2023. – 416 s.
- [6] Uchebnaya seriya ASP.NET Core MVC s EF Core. Dokumentatsiya Microsoft Learn. – 2025. – <https://learn.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/data/ef-mvc/>.
- [7] Sokovykh P. Menyaem skhemu bazy dannykh v PostgreSQL, ne ostanavlivaya rabotu prilozheniya // Tproger. – 2019. – <https://tproger.ru/translations/postgres-ddl-without-downtime>.
- [8] PostgreSQL: Nepreryvnoe arkhivirovanie i vosstanovlenie na moment vremeni (Point-in-Time Recovery, PITR) // Dokumentatsiya PostgreSQL. – <https://postgrespro.ru/docs/postgresql/current/continuous-archiving>.

# Обеспечение непрерывной высокоскоростной беспроводной связи на основе программно-аппаратного комплекса с интеллектуальным управлением гибридными каналами

А.Е.Алишева, Н.С. Мальцева, А.В. Осовский

*Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия*

**Аннотация** – В беспроводных системах передачи данных атмосферно-оптические линии связи (АОЛС) обеспечивают пропускную способность до 40 Гбит/с при отсутствии лицензионных ограничений и высокой криптостойкости, однако подвержены резкому затуханию сигнала из-за погодных факторов. Гибридные архитектуры АОЛС + радиоканалы (E-band, V-band) позволяют повысить доступность, но традиционные реактивные механизмы переключения приводят к потере пакетов и разрывам сессий. Предлагаемый программно-аппаратный комплекс реализует предиктивное управление на основе моделей машинного обучения, выполняемых на микроконтроллере архитектуры RISC-V с технологией TinyML. В программно-аппаратном комплексе непрерывно анализируются телеметрические данные и прогнозируется деградация канала заранее, что позволяет обеспечивать доступность канала без разрыва сессии, даже при туманности, осадках и турбулентности. Используемая архитектура разделяет плоскость управления (TinyML на RISC-V) и плоскость данных (коммутационные схемы ASIC), что приводит к вендор-нейтральности посредством интерфейсов SFP+ и Ethernet.

**Ключевые слова** – АОЛС, гибридная линия связи, TinyML, машинное обучение, предиктивное переключение, RISC-V

## ВВЕДЕНИЕ

Свободно-пространственная оптическая связь (англ. Free Space Optical communication, FSO), или атмосферно-оптические линии связи (АОЛС) представляют собой одну из наиболее перспективных технологий беспроводной передачи данных на сегодняшний день. Используя оптическое излучение в диапазоне длин волн 850–1550 нм в качестве носителя информации, такие системы обеспечивают пропускную способность, сопоставимую с волоконно-оптическими линиями, при этом сохраняют преимущества беспроводного развертывания: отсутствие необходимости в прокладке кабеля, быструю установку и относительно низкую стоимость инфраструктуры на коротких и средних дистанциях [1].

АОЛС обеспечивают гигабитные и терабитные скорости на дистанциях 0,3–5 км (до 10–11 км в идеальных условиях), не требуют лицензий и обладают высокой направленностью луча, что минимизирует возможности перехвата сообщений. Ключевым ограничением по-прежнему остаётся зависимость от состояния атмосферы. Туман, дождь и снег ослабляют сигнал за счёт поглощения и рассеяния, а турбулентность приводит к нестабильности луча. В результате наблюдаются мерцание, смещение траектории и заметные колебания интенсивности.

На массовом рынке до сих пор нет полноценных решений, которые в автоматическом режиме объединяли бы разные каналы связи и заранее подстраивали их работу под меняющиеся условия.

Программно-аппаратный комплекс выступает как единый «координатор». Он собирает телеметрию из разных источников, отслеживает тревожные изменения и ещё до ухудшения связи перераспределяет нагрузку между каналами. За счёт этого передача данных не обрывается даже в моменты резкого ухудшения условий распространения сигнала.

## I. ОБЗОР FSO/RF-СИСТЕМ С ПРЕДИКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

АОЛС – вид связи, позволяющий передавать данные между объектами в атмосфере, имея оптическое соединение без использования оптоволокна или радиоэфира [2].

Развитие технологий атмосферной оптической связи представляет собой перспективное направление в области телекоммуникаций, обеспечивая высокоскоростную передачу данных без необходимости развертывания физической инфраструктуры. В то же время российские и зарубежные исследования последовательно подтверждают их главную уязвимость – резкое падение качества при ухудшении видимости, турбулентности или осадках.

Ранние работы по гибридным системам, сочетающим оптическую связь (FSO) и радиочастоты (RF), появились ещё в 2000-х – 2010-х годах. В частности, Вишневецкий В.М. и соавторы в 2007–2013 годах разработали математические модели высокоскоростных гибридных каналов на базе лазерной и радио технологий, показав, что комбинация позволяет существенно повысить общую надёжность по сравнению с одиночными каналами [3]. При ухудшении оптического сигнала система переходила на радиоканал, а после восстановления условий возвращалась обратно, минимизируя простои. Тем не менее эти модели в основном опирались на реактивную логику переключения, что приводило к неизбежным потерям пакетов в момент переключения от одного канала к другому.

Зарубежные исследования развивают эту идею ещё более детально. Уже в 2020 году Halaška R. [4] применил регрессионные алгоритмы машинного обучения (случайный лес, адаптивный и градиентный бустинг) для прогноза уровня принятого оптического сигнала RSSI, (Received Signal Strength Indicator) по реальным метеопараметрам — температуре, влажности, видимости и концентрации частиц. Модели, предложенные Kiran K.V [5] показали коэффициент детерминации  $R^2$  до 0,89, что позволяло инициировать переключения ещё до обрыва связи. Модель вышла за рамки простой фиксации состояния среды и начала решать более прикладную задачу, предсказывать, какой уровень сигнала потребуется при текущих погодных условиях. Это особенно важно для систем связи, где дождь, туман или резкие изменения влажности сразу влияют на устойчивость канала. Значимость такого подхода состоит не только в повышении точности прогноза. Сеть получает возможность действовать на опережение, а не реагировать уже после ухудшения связи.

Схожую логику демонстрирует исследование М. Açıkgöz и М. Yücel [6]. Автор рассматривает концепцию жёсткого переключения для гибридной среды связи, где объединяются радиочастотный канал, атмосферно-оптическая линия в свободном пространстве и видимая световая связь RF/FSO/VLC. В основе архитектуры лежит не один алгоритм, а сразу несколько инструментов машинного обучения, включая искусственные нейронные сети, методы опорных векторов, деревья решений и случайные леса. Такой набор выглядит оправданным, поскольку разные модели по-разному справляются с шумом, нелинейностью и быстрыми колебаниями параметров канала. За счёт этого система может непрерывно отслеживать состояние среды и почти без задержки выбирать более подходящий способ передачи данных. Качество обслуживания (Quality of Service, QoS) удерживается не формально, а за счёт реального сокращения времени на переключение между каналами.

Ещё один важный шаг в сторону интеллектуального управления предложил Bithas P.S. [7]. Его работа сосредоточена уже не просто на выборе доступного канала, а на выборе канала с минимальными сигнальными накладными расходами в космическо-воздушно-наземных сетях. Во многих работах акцент делается только на надёжности или пропускной способности, тогда как избыточные служебные сигналы сами по себе начинают перегружать систему. Подход показывает более зрелое понимание архитектуры сети, где важен не только факт переключения, но и его цена для всей инфраструктуры.

Такой подход заметно снижает вероятность простоя канала за счёт уменьшения объёма служебного трафика и более эффективного принятия решений.

В России главной задачей стоит прикладная реализация атмосферно-оптической линии связи ввиду региональных особенностей.

В трудах [8] Сапожниковым М.В., Казанцевым С.Ю. и их соавторами предложена методика оценки доступности АОЛС для промышленных и энергетических объектов. Они создали карты применимости, которые учитывают климатические зоны, уровень атмосферной турбулентности, частоту туманов и загрязнение воздуха. Благодаря этому можно заранее понять, насколько эффективно будет работать АОЛС – от северных регионов с экстремально низкими температурами до промышленных зон с высоким содержанием аэрозолей.

Переход к предиктивным подходам особенно заметен в работе Лебедева И.В. [9]. Автор обосновал использование машинного обучения для прогнозирования доступности каналов связи на основе многолетних метеорологических данных. Модели случайного леса, градиентного бустинга и нейронных сетей позволяют предсказывать ухудшение сигнала с горизонтом от десятков секунд до нескольких минут. Это даёт возможность заранее перераспределять трафик и предотвращать потери пакетов.

Сапожниковым М.В. и Мироновым Ю.Б. в [10] была предложена математическая модель оценки атмосферных потерь в квантовом канале связи.

Для моделирования влияния тумана до сих пор чаще всего применяют хорошо известную эмпирическую модель Крузе и Кима [11, 12]:

$$\alpha_{\text{тумана}} = \frac{3,91}{V} \times \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{тумана}}$  – коэффициент затухания в тумане,  $V$  – видимость в км,  $\lambda$  – длина волны излучения в нм,  $q$  – определяется типом тумана.

Для осадков применяется степенная зависимость:

$$\gamma_{\text{дождя}} = k \cdot (R)^\alpha, \quad (2)$$

где  $\gamma_{\text{дождя}}$  – удельное затухание при дожде,  $R$  – интенсивность осадков в мм/ч,  $k$  и  $\alpha$  определяются экспериментально.

Эти модели подтверждены многолетними измерениями и активно используются при генерации синтетических датасетов для обучения алгоритмов машинного обучения. Использование синтетических датасетов (искусственно созданных наборов данных), позволяет проводить эксперименты генерируя разные сценарии, задавая начальные данные, такие как погодные условия, расстояния, мощность и уровень турбулентности. В совокупности это формирует основу для перехода от реактивных методов компенсации к предиктивным системам управления каналами в гибридных АОЛС, что является ключевым направлением современных исследований и разработок.

Для реализации предиктивных алгоритмов на компактных устройствах всё чаще привлекают технологию запуска алгоритмов искусственного интеллекта непосредственно на локальных устройствах (Edge AI), а также направление машинного обучения, ориентированное на запуск моделей на микроконтроллерах и IoT с ограниченными ресурсами (TinyML). Отечественные разработки микроконтроллеров на архитектуре RISC-V (НИИЭТ, Микрон, Байкал Электроникс) создают базу для суверенных решений с низким энергопотреблением и задержкой принятия решений менее 1 мс [13]. Общие публикации по RISC-V в телекоммуникациях подтверждают возможность размещения компактных моделей прогнозирования прямо на устройстве без обращения к облаку.

Накопленный массив публикаций ясно показывает: движение от реактивного переключения к предиктивному управлению на компактных моделях машинного обучения и открытых архитектурах RISC-V открывает реальный путь к доступности канала и бесшовной передаче данных даже в самых неблагоприятных погодных условиях.

## II. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

На рынке высокоскоростных беспроводных систем передачи данных в настоящее время отсутствуют автономные программно-аппаратные устройства, способные осуществлять предиктивное управление разнородными внешними модемами атмосферно-оптических систем и радиоканалов на основе алгоритмов машинного обучения. Тем не менее ряд решений смежного класса может рассматриваться заказчиками как возможная альтернатива, хотя каждое из них обладает существенными ограничениями по сравнению с предлагаемым подходом.

Одну из наиболее распространённых групп составляют интегрированные гибридные терминалы, объединяющие в одном корпусе оптический (FSO) и радиоканал. Среди них можно выделить продукцию компаний LightPointe (США) [14], Wireless Excellence

(Великобритания) [15] и отечественного производителя Mostcom [16]. Такие устройства используют простейшую реактивную логику переключения: радиоканал активируется только после полной потери оптического сигнала. Архитектура остаётся закрытой, привязанной к собственным модемам вендора, а механизмы предиктивного анализа на базе машинного обучения полностью отсутствуют. Стоимость комплекта варьируется от 25 до 60 тысяч долларов в зависимости от заявленной дальности и пропускной способности [14–16].

Отдельную группу решений формируют SD-WAN-контроллеры и граничные устройства, к которым относятся Cisco Viptela [17], Fortinet [18] и VMware Velocloud [19]. Их сильная сторона связана с логикой сетевого уровня. Такие платформы достаточно уверенно распределяют трафик между MPLS, публичным интернетом и мобильными каналами LTE или 5G, выбирая маршрут по текущей загрузке и политике приоритизации. Для корпоративной WAN-инфраструктуры это удобно, особенно там, где критична отказоустойчивость филиальной сети и нужно быстро переводить приложения с одного транспорта на другой без ручного вмешательства. Но в контексте гибридных FSO/RF-систем этого уже недостаточно. Здесь проходит граница между классическим SD-WAN и действительно интеллектуальным управлением физической средой передачи. Устройства этого класса работают на уровне L3 и выше, поэтому не видят сам механизм деградации беспроводного оптического канала. Они не анализируют туман, осадки, аэрозольные помехи, не связывают падение качества канала с погодным сценарием и не умеют заранее предсказывать ухудшение FSO-линии. Фактически система начинает реагировать уже после появления проблемы, а не до неё. При стоимости одного устройства примерно от 25 до 60 тысяч долларов и дополнительной ежегодной подписке на программное обеспечение, это ограничение выглядит весьма существенным.

Иной класс представляют системы мониторинга и сетевой оркестрации, которые предлагают Huawei, Nokia, SolarWinds и другие вендоры [20–22]. Их задача заключается в сборе телеметрии, централизуют контроль и поддерживают частичную автоматизацию, но, как правило, такие платформы базируются на серверной архитектуре. В этом проявляется недостаток традиционных NMS-подходов.

Стоимость внедрения таких решений начинается от 50 тысяч долларов за лицензию и услуги интеграции.

Отдельно стоит отметить чисто оптические терминалы атмосферной связи в свободном пространстве. Среди них:

- Mynaric HAWK (Германия) — полнодуплексный терминал со скоростью 1–9 Гбит/с, ориентированный на наземные и воздушные приложения, ориентировочная цена около 50 тыс. долларов [23];

- LightPointe AIRE X-STREAM (США) — лазерный мост с ультранизкой задержкой, 1,25 Гбит/с, дальность до 2,8 км в условиях слабого затухания, цена 25–45 тыс. долларов [14];

- fSONA SONAbeam серии 1250E и 2500E (Канада) – скорости 1,25 и 2,5 Гбит/с, дальность до 2,7 км в чистом воздухе, цена 20–35 тыс. [24];

- Mostcom (Россия) — терминалы до 10 Гбит/с и дальностью до 5 км (модель M1-GE-SL), цена 15–30 тыс. долларов, с опциональным радиоканалом интеллектуального управления [16].

Радиорелейные системы миллиметрового диапазона также предлагают высокие скорости. Пример – CableFree MMW Hybrid от Wireless Excellence (Великобритания) [15] до 10 Гбит/с в E-band, дальность до 3 км, цена 35–55 тыс. долларов. Однако и здесь отсутствует предиктивная логика на базе искусственного интеллекта.

Практически все существующие продукты обладают общими ограничениями:

- реактивный принцип переключения (переход на другой канал связи только после фактической потери сигнала);

- отсутствие предиктивной аналитики на основе машинного обучения;

- жёсткая привязка к оборудованию одного производителя или отсутствие поддержки разнородных модемов;

- игнорирование метеорологических факторов при принятии решений;

- недостаточная интеграция с системами автоматизированного управления сетевыми ресурсами на физическом уровне.

### III. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ГИБРИДНЫМИ КАНАЛАМИ СВЯЗИ

Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс (ПАК) обладает рядом характеристик, которые существенно отличают его от существующих на рынке подходов к организации гибридных атмосферно-оптических и радиоканалов.

Ключевое различие разрабатываемого подхода проявляется в изменении логики принятия решений в системе управления каналами связи за счет машинного обучения.

В традиционных архитектурах переключение между каналами реализуется по реактивному принципу.

Система фиксирует ухудшение параметров уже в момент достижения пороговых значений, после чего инициирует переход.

В предлагаемом ПАК логика управления строится не на запоздалой реакции на уже возникший сбой, а на предварительной оценке того, как меняются параметры среды и к чему эти изменения приведут в ближайший момент. Именно это является ключевым отличием от

существующих решений. Вопрос уже не в том, чтобы просто зафиксировать ухудшение канала, а в том, чтобы распознать его приближение и обеспечить временной запас для управленческого действия.

Практическая ценность такого подхода заметна в момент принятия решения. Если система видит динамику к деградации канала заранее, примерно за 30–120 секунд до критического состояния, она получает возможность переключить соединение не в аварийном режиме, а в контролируемом. Формально этот интервал невелик. Но в реальной эксплуатации даже такой запас времени может оказаться решающим. Этого достаточно, чтобы снизить потери пакетов, уменьшить скачки задержки и сделать сам переход почти незаметным для пользовательских сервисов. Итоговая эффективность определяется не только качеством прогноза. Не менее важна скорость, с которой прогноз превращается в конкретное действие [25].

ПАК не требует глобальной модернизации существующей сети, а встраивается с минимальными изменениями. Использование стандартных интерфейсов Ethernet и SFP+, а также типовых протоколов управления создаёт вендор-независимую среду. На практике это означает более простое подключение к уже существующим узлам сети, меньше жёсткой привязки к одному поставщику и более реалистичный сценарий масштабирования.

Предлагаемый ПАК отличается тем, что центр управления переносится на физический уровень канала. В системах класса SD-WAN решение обычно принимается по косвенным сетевым признакам, например по задержке, потере пакетов или доступности маршрута. В ПАК первичными становятся не последствия деградации, а её ранние физические симптомы. К ним относятся уровень принятой оптической мощности, коэффициент битовых ошибок BER (Bit Error Rate), атмосферные воздействия, турбулентность и даже механические колебания, влияющие на юстировку оптической линии. Сетевые метрики почти всегда запаздывают, потому что отражают уже накопившийся эффект, тогда как физические параметры позволяют увидеть начало проблемы раньше и отделить деградацию канала от перегрузки сети или ошибок маршрутизации.

Отсюда вытекает выбор алгоритма переключения. Он реализуется на уровне пакетов и дополняется буферизацией и синхронизацией потоков, чтобы переход между FSO и RF не разрушал активные соединения. Практически это означает не просто смену трассы передачи, а плавный хэндовер без резкого роста задержек и без заметного для пользователя разрыва сессии.

Аппаратную часть ПАК предполагается реализовать на базе микроконтроллера K1921BG015 с архитектурой RISC-V. Такой выбор обусловлен гибкостью настройки вычислительных процессов.

В отличие от более распространённых решений с закрытой архитектурой, RISC-V предоставляет разработчику доступ к модификации набора инструкций, что позволяет оптимизировать обработку телеметрических данных и специализированных метрик канала [13].

Практическая ориентация комплекса видна не в общих декларациях, а в выборе интерфейсов. Поддержка Ethernet и модулей SFP+ делает систему совместимой не только с абстрактной сетевой инфраструктурой, а вполне с конкретным классом высокоскоростных транспортных решений, которые уже используются на рынке. У fSONA [24] линейки SONAbeam работают с Gigabit Ethernet и в ряде моделей поддерживают native Ethernet и SFP, а у BridgeWave в серии Flex4G-10000 заявлены 10G, 2.5G и 1G SFP+ интерфейсы вместе с Ethernet-портами. Это важная деталь. Она означает, что внедрение не упирается в специфическую аппаратную конфигурацию и не требует строить отдельный контур только ради одного нового узла. Не менее показательным является то, что в комплексе сохранены RS-232 и RS-485. Старые программируемые логические контроллеры (ПЛК), приводы, измерительные приборы и сервисные консоли до сих пор нередко завязаны именно на последовательные соединения, и потому отказ от них для современной архитектуры часто оказывается не прогрессом, а лишним барьером внедрения.

Поддержка SNMP (англ. Simple Network Management Protocol) и NETCONF (англ. NETwork CONFiguration) усиливает ту же логику. Протокол SNMP по-прежнему остаётся базовым механизмом наблюдения и обмена управленческой информацией, а протокол NETCONF был разработан именно как стандартный протокол установки, изменения и удаления конфигурации сетевых устройств. В связке это снижает порог интеграции с уже работающими системами мониторинга и администрирования. ПАК может выступать частью существующей операционной среды без болезненной замены привычных инструментов.

Предложенный подход реализует сдвиг от реактивного управления к предиктивному.

Обзоры по гибридным FSO/RF-сетям прямо указывают, что такие системы развиваются в сторону более сложных механизмов переключения, практических сценариев и применения машинного обучения, а реальные эксперименты всё чаще строятся вокруг атмосферных воздействий и интеллектуального выбора канала.

Архитектура программно-аппаратного комплекса (ПАК) разделена на плоскость управления и плоскость данных (см. Рис.1).

В предложенной архитектуре управление системой предполагается реализовывать на высокопроизводительном микроконтроллере с архитектурой RISC-V [13]. Эта плоскость отвечает за выполнение моделей искусственного интеллекта,

оптимизированных под TinyML, и выполняет несколько ключевых функций.

Она агрегирует телеметрические данные о состоянии каналов – уровень сигнала, коэффициент битовых ошибок, задержку от подключённых модемов, а также внешние метеосо условия. На основе этих данных выполняется анализ качества сигнала в реальном времени и формируются прогнозы, позволяющие инициировать предиктивные переключения между каналами.

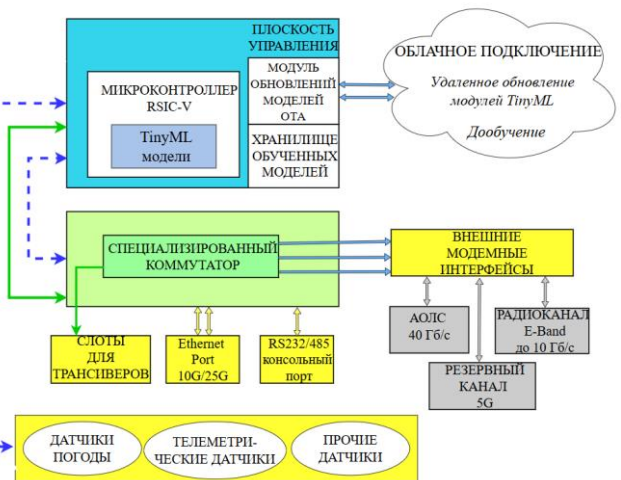


Рис.1 Функциональная схема программно-аппаратного комплекса с интеллектуальным управлением гибридными каналами

Плоскость данных, в отличие от управляющей, реализуется на базе ASIC, что обеспечивает существенно более высокий уровень производительности [25-28]. Передача трафика со скоростью до 40 Гбит/с осуществляется без участия управляющего ядра, исключая узкие места и снижая вероятность деградации потоков данных. Подобная архитектура напоминает подход, применяемый в современных дата-центровых коммутаторах, где управление и передача данных строго разделены.

Для атмосферных оптических линий связи нельзя рассматривать все вычислительные задачи как равнозначные. Здесь критичны высокая пропускная способность, минимальная задержка и отсутствие провалов в момент переключения. Контур мониторинга и прогноза устроен иначе. Ему важны не скорость передачи, а стабильный цикл измерений, предсказуемое время реакции и высокая точность телеметрии.

Анализ состояния канала логично вынести на микроконтроллерную платформу, где ниже энергопотребление и проще обеспечить детерминированное выполнение операций. В системах реального времени важна не максимальная скорость, а возможность заранее понимать, сколько займёт обработка каждого цикла. Это особенно ценно при работе с телеметрией, которая приходит непрерывно и

должна быстро превращаться в решение о переключении.

Ключевую роль в этой логике играет TinyML. В обзорах Ray P. P [29] и Heydari S., Mahmoud Q. H. [30] подчёркивается, что для такого класса устройств типичны конфигурации с памятью порядка менее 1 МБ, а значит, модель должна быть компактной и заранее адаптированной под жёсткие аппаратные ограничения. Такой подход заставляет проектировать интеллект не как внешнюю надстройку, а как часть самого оборудования.

Практика становится заметна на уровне самих прогнозов. Если устройство локально собирает данные об уровне сигнала, погодных параметрах и статистике ошибок, оно может не просто фиксировать сбой, а замечать его приближение. Для гибридных FSO/RF-систем такая постановка уже подтверждается работами Larčák M., Ovseník Ľ [31] и более поздними исследованиями группы Lionis A., Peppas K., Nistazakis H. E., Tsigopoulos A., Cohn K. [32], где прогноз RSSI и погодных параметров используется как основа для адаптивного хэндовера.

Локализация вычислений даёт комплексу ещё одно важное свойство – автономность. Даже если внешний канал управления временно недоступен, устройство сохраняет возможность анализировать состояние среды и заранее инициировать переключение. Для АОЛС это особенно важно, потому что деградация канала часто развивается быстрее, чем удалённая система успевает собрать данные, передать их в облако и вернуть команду обратно. Устойчивость создаётся не только за счёт точности модели, но и за счёт близости вычисления к самому каналу.

Долгосрочную эффективность такой системы определяет не стартовая точность модели, а её способность подстраиваться под конкретную территорию. Например, для Астрахани характерен заметно более сухой режим, около 256 мм осадков в год, средняя температура порядка плюс 11,8–12,6 °С и средняя влажность около 61%. В Москве картина уже другая, средняя годовая температура около плюс 6,5 °С, влажность около 71,5%, а в холодный сезон относительная влажность по месяцам держится примерно в диапазоне 80–85%. В Норильске средняя годовая температура около минус 9,1 °С, влажность около 80,4%, а годовое количество осадков составляет примерно 562–752 мм [33].

Механизм OTA-обновлений в такой архитектуре нужен не как сервисное дополнение, а как основной способ переноса накопленного опыта в поле. Работа L. Formánek [34] показывает, что современные OTA-схемы для Edge-устройств уже поддерживают централизованное управление версиями, проверку совместимости и доставку обновлений через неоднородные каналы связи.

#### IV. ПРЕИМУЩЕСТВА ВЫБРАННОГО АРХИТЕКТУРНОГО РЕШЕНИЯ

Сочетание RISC-V и TinyML задаёт для таких систем не просто новую аппаратную базу, а другую инженерную логику. Центр тяжести смещается с универсального процессора на платформу, которая заранее подстроена под одну группу задач, анализ телеметрии, оценку состояния канала и быстрое локальное решение без обращения к внешним вычислениям. Канал здесь меняется не по расписанию, а под действием тумана, влаги, турбулентности и вибраций, поэтому ценность платформы определяется не абстрактной производительностью, а тем, насколько ровно и предсказуемо она отрабатывает каждый цикл анализа. RISC-V при этом важен не сам по себе, а как открытый стандарт ISA с публично доступными спецификациями, а TinyML, по выводам обзоров, как раз лучше всего работает там, где нужны быстрый отклик, локальная обработка и независимость от облака.

Практический смысл решения усиливается ещё и технологической независимостью. У RISC-V открыта сама архитектурная основа, а не только отдельные инструменты вокруг неё, поэтому разработчик получает доступ к более глубокой оптимизации программного и аппаратного уровня.

Отсюда следует и следующий шаг – возможность адаптировать набор инструкций и вычислительные блоки под конкретные операции телеметрического анализа.

Для АОЛС это особенно важно, потому что погода и механика линии меняют состояние канала быстро, а ошибка в несколько лишних шагов обработки уже переходит в потерянное время.

Решающим фактором в данной архитектуре выступает не сам микроконтроллер, а разнесение функциональных контуров по разным вычислительным плоскостям [35, 36]. В системах смешанной критичности проблема обычно возникает не на уровне пиковой производительности, а в точках совместного доступа к памяти, межсоединению и шинам, где некритичные задачи начинают вносить джиттер в работу тех модулей, для которых важна гарантированная реакция.

#### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПАК с интеллектуальным управлением формирует уровень управления беспроводными каналами связи. Использование предиктивных алгоритмов позволяет не просто компенсировать последствия атмосферных помех, а снижать их влияние до момента критического ухудшения канала.

Архитектурное преимущество комплекса определяется сочетанием трёх факторов. Первый фактор связан с применением открытой архитектуры

RISC-V, которая снижает зависимость от закрытых платформ и расширяет возможности аппаратно-программной настройки. Вторым фактором является использование TinyML, что позволяет выполнять прогноз локально, без обращения к внешнему вычислительному контуру, и тем самым уменьшать задержку принятия решения. Третьим фактором является разделение плоскости управления и плоскости данных. Такое решение уменьшает конкуренцию за общие вычислительные ресурсы и повышает предсказуемость реакции системы при высокой загрузке линии.

Существенным результатом предложенного подхода следует считать не только повышение отказоустойчивости гибридной линии, но и рост её эксплуатационной адаптивности. Возможность локального накопления статистики, OTA-обновления и последующего дообучения модели делает систему чувствительной к региональным особенностям среды. Для АОЛС это особенно значимо, поскольку профиль затухания, турбулентности и метеорологических воздействий заметно различается между регионами, а значит, единая статическая модель со временем теряет точность. В этом смысле перспективность комплекса определяется не стартовой конфигурацией, а способностью к длительной адаптации в реальных условиях эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Andrews L.C. Laser Beam Propagation through Random Media : монография / L.C. Andrews, R.L. Phillips. – 2nd ed. – Bellingham, WA : SPIE Press, 2005. – 782 p.
- [2] Сербин Е.М. Всепогодная атмосферная оптическая линия связи [Электронный ресурс] // НиКа. – 2013. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vsepogodnaya-atmosfernaya-opticheskaya-liniya-svyazi> (дата обращения: 28.03.2026).
- [3] Вишневецкий В.М. Моделирование и анализ гибридного канала связи на базе лазерной и радио технологий [Электронный ресурс] / В.М. Вишневецкий, О.В. Семенова, С.Ю. Шаров // УБС. – 2011. – № 35. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-analiz-gibridnogo-kanala-svyazi-na-baze-lazernoy-i-radio-tehnologii> (дата обращения: 13.01.2026).
- [4] Prediction of Received Optical Power for Switching Hybrid FSO/RF System / R. Haluška, P. Šufaj, E. Ovsenič, S. Marchevský, J. Papaj, L. Doboš // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 1261. – DOI: 10.3390/electronics9081261.
- [5] Machine learning aided switching scheme for hybrid FSO/RF transmission / K.V. Kiran, S. Perinbaraj, J. Pradhan, P.K. Mallick, A.K. Turuk, S.K. Das // Intelligent Decision Technologies. – 2020. – Vol. 14. – No. 4. – P. 529–536. – DOI: 10.3233/IDT-190161.
- [6] Açıkgöz M. Machine Learning-Assisted Hard Switching Scheme for Next Generation Optical Wireless Hybrid Communication Systems / M. Açıkgöz, M. Yücel // International Journal of Communication Systems. – 2026. – Vol. 39. – No. 1. – Art. e70324. – DOI: 10.1002/dac.70324.
- [7] Bithas P.S. Hybrid FSO/RF Communications in Space-Air-Ground Integrated Networks: A Reduced Overhead Link Selection Policy / P.S. Bithas, H.E. Nistazakis, A. Katsis, L. Yang // Electronics. – 2024. – Vol. 13. – No. 4. – Art. 806. – DOI: 10.3390/electronics13040806.
- [8] Разработка карты применимости атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики Российской Федерации / С.Ю. Казанцев, М.В. Сапожников, Д.Н. Терехин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16. – № 1. – С. 5–12. – DOI: 10.56304/S2079562924060162.
- [9] Лебедев И.В. Методы машинного обучения в прогнозировании времени доступности атмосферных оптических линий связи на основе многолетних данных о состоянии атмосферы [Электронный ресурс] // Вестник науки. – 2025. – № 3(84). – URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/metody-mashinnogo-obucheniya-v-prognozirovanii-vremeni-dostupnosti-atmosfernyh-opticheskikh-linii-svyazi-na-osnove-mnogoletnih](https://cyberleninka.ru/article/n/metody-mashinnogo-obucheniya-v-prognozirovanii-vremeni-dostupnosti-atmosfernyh-opticheskikh-linii-svyazi-na-osnove-mnogoletnih-dannyyh) (дата обращения: 28.03.2026).
- [10] Сапожников М.В. Методика оценки потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью в квантовом канале связи с КРК / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, С.Ю. Казанцев // Электросвязь. – 2025. – № 8. – С. 60–69. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.70.8.007.
- [11] Kruse P.W. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection / P.W. Kruse, L.D. McLaughlin, R.B. McQuistan. – New York : Wiley, 1962. – 448 p.
- [12] Kim I.I. Comparison of Laser Beam Propagation at 785 nm and 1550 nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications / I.I. Kim, B. McArthur, E.J. Korevaar // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4214. – P. 26–37. – DOI: 10.1117/12.417512.
- [13] RISC-V Architecture Overview [Электронный ресурс] // RISC-V International. – URL: <https://riscv.org> (дата обращения: 22.01.2026).
- [14] LightPointe [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lightpointe.com/> (дата обращения: 04.03.2026).
- [15] CableFree [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cablefree.net/> (дата обращения: 13.02.2026).
- [16] MOSTCOM [Электронный ресурс]. – URL: <https://mocom.ru/> (дата обращения: 15.01.2026).
- [17] Cisco (Viptela) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cisco.com> (дата обращения: 15.01.2026).
- [18] Fortinet. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fortinet.com/> (дата обращения: 15.01.2026).
- [19] VMware (Velocloud). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vmware.com/> (дата обращения: 15.01.2026).
- [20] iMaster NCE [Электронный ресурс] // Huawei. – URL: <https://e.huawei.com/en/products/network-analysis> (дата обращения: 19.01.2026).
- [21] Network Services Platform (NSP) [Электронный ресурс] // Nokia. – URL: <https://www.nokia.com/ip-networks/network-services-platform/> (дата обращения: 24.01.2026).
- [22] Network Monitoring Solutions [Электронный ресурс] // SolarWinds. – URL: <https://www.solarwinds.com/solutions/network-solutions> (дата обращения: 18.02.2026).
- [23] HAWK – Optical Communication Terminal for Airborne and Ground Operations [Электронный ресурс] // Mynaric. – URL: <https://mynaric.com/products/hawk/> (дата обращения: 13.02.2026).
- [24] Products [Электронный ресурс] // fSONA. – URL: <https://www.fsona.com/product.php?sec=2500e> (дата обращения: 22.02.2026).
- [25] Kutuzov D. Crossbar Switch Arbitration with Traffic Control for NoC / D. Kutuzov, A. Osovsky, D. Starov, O. Stukach, N. Maltseva, D. Surkov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, Russian Federation, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002976.
- [26] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661380 Российской Федерации. Элемент коммутации для коммуникационных структур высоконагруженных маршрутизаторов / Д.В. Кутузов, А.В. Осовский, О.В. Стукач [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – № 2019660257; заявл. 19.08.2019; опубл. 28.08.2019.
- [27] Кутузов Д.В., Осовский А. В., Стукач О. В. Модель генерации и обработки трафика IoT параллельными коммутационными системами // Вестник СибГУТИ. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-generatsii-i-obrabotki-trafika-iot-parallelnymi-kommutatsionnymi-sistemami> (дата обращения: 21.02.2026).
- [28] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614395 Российская Федерация. Система моделирования процесса передачи трафика в условиях

непрерывного обрыва и восстановления каналов связи / А.А. Сорокин, А.В. Осовский, Д.В. Кутузов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – Заявл. 11.02.2026. – Опубл. 16.02.2026.

- [29] Ray P.P. A Review on TinyML: State-of-the-Art and Prospects // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34. – No. 4. – P. 1595–1623. – DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.11.019.
- [30] Heydari S. Tiny Machine Learning and On-Device Inference: A Survey of Applications, Challenges, and Future Directions // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – No. 10. – Art. 3191. – DOI: 10.3390/s25103191.
- [31] Lapčák M. Investigation of Machine Learning Methods for Prediction of Measured Values of Atmospheric Channel for Hybrid FSO/RF System / M. Lapčák, L. Ovseník, J. Oravec, N. Zdravecký // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 524. – DOI: 10.3390/photonics9080524.
- [32] Lionis, A., Peppas, K., Nistazakis, H. E., Tsigopoulos, A. D., & Cohn, K. Experimental Performance Analysis of an Optical Communication Channel over Maritime Environment. // Electronics – 2020. - Vol. 9. – No. 7. – Art. 1109. – DOI: 10.3390/electronics9071109
- [33] Погода и климат [Электронный ресурс] // Climate-Data.org. – URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru> (дата обращения: 27.02.2026).
- [34] Formanek L. Advanced System for Remote Updates on ESP32-Based Devices Using Over-the-Air Update Technology / L. Formanek, M. Kubascik, O. Karpis, P. Kolok // Computers. – 2025. – Vol. 14. – No. 12. – Art. 531. – DOI: 10.3390/computers14120531.
- [35] Развитие средств параллельной коммутации в системах связи 5G / Д.В. Кутузов, А.В. Осовский, Д.В. Старов, Е.А. Моторина // Радиотехника. – 2019. – № 3. – С. 70–78.
- [36] Осовский, А.В. Анализ и расчёт трафика в телекоммуникационных системах: учебное пособие / А.В. Осовский, Н.С. Мальцева, Д.В. Кутузов; ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2022. – 164 с. – ISBN 978-5-89154-739-1.

### Информация об авторах

Алишева Альбина Ерсайиновна, аспирант Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [alisheva94@mail.ru](mailto:alisheva94@mail.ru), ORCID: 0009-0004-7359-9453

Мальцева Наталия Сергеевна, к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [maltsevans@mail.ru](mailto:maltsevans@mail.ru), ORCID: 0000-0001-9731-4281

Осовский Алексей Викторович, к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [a\\_osovskiy@mail.ru](mailto:a_osovskiy@mail.ru), ORCID: 0000-0002-3174-9765

### Ensuring Continuous High-Speed Wireless Communication of a Hybrid Architecture Based on a Hardware-Software Complex with Intelligent Control

Alisheva A.E., Maltseva N.S., Osovsky A.V.

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Abstract** – In wireless data transmission systems, atmospheric optical communication links (AOLCs) provide throughput of

up to 40 Gbit/s without licensing restrictions and high cryptographic strength; however, they are subject to severe signal attenuation due to weather conditions. Hybrid AOLC + radio channel architectures (E-band, V-band) can improve availability, but traditional reactive switching mechanisms lead to packet loss and session interruptions. The proposed hardware-software complex implements predictive control based on machine learning models executed on a RISC-V architecture microcontroller using TinyML technology. The hardware-software complex continuously analyzes telemetry data and predicts channel degradation in advance, ensuring channel availability without session interruption even under fog, precipitation, and turbulence. The adopted architecture separates the control plane (TinyML on RISC-V) from the data plane (ASIC switching fabrics), resulting in vendor neutrality through SFP+ and Ethernet interfaces.

**Keywords** – AOLC, hybrid communication link, TinyML, machine learning, predictive switching, RISC-V

### REFERENCES

- [1] Andrews L.C. Laser Beam Propagation through Random Media : монография / L.C. Andrews, R.L. Phillips. – 2nd ed. – Bellingham, WA : SPIE Press, 2005. – 782 p.
- [2] Serbin E.M. Vsepogodnaya atmosfernaya opticheskaya liniya svyazi [Elektronnyj resurs] // NiKa. – 2013. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vsepogodnaya-atmosfernaya-opticheskaya-liniya-svyazi> (date of access: 28.03.2026).
- [3] Vishnevskij V.M. Modelirovanie i analiz gibridnogo kanala svyazi na baze lazernoj i radio tekhnologij [Elektronnyj resurs] / V.M. Vishnevskij, O.V. Semenova, S.YU. SHarov // UBS. – 2011. – № 35. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-analiz-gibridnogo-kanala-svyazi-na-baze-lazernoj-i-radio-tehnologiy> (date of access: 13.01.2026).
- [4] Prediction of Received Optical Power for Switching Hybrid FSO/RF System / R. Haluška, P. Suřaj, L. Ovseník, S. Marchevský, J. Papaj, L. Doboř // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 1261. – DOI: 10.3390/electronics9081261.
- [5] Machine learning aided switching scheme for hybrid FSO/RF transmission / K.V. Kiran, S. Perinbaraj, J. Pradhan, P.K. Mallick, A.K. Turuk, S.K. Das // Intelligent Decision Technologies. – 2020. – Vol. 14. – No. 4. – P. 529–536. – DOI: 10.3233/IDT-190161.
- [6] Açıkgöz M. Machine Learning-Assisted Hard Switching Scheme for Next Generation Optical Wireless Hybrid Communication Systems / M. Açıkgöz, M. Yücel // International Journal of Communication Systems. – 2026. – Vol. 39. – No. 1. – Art. e70324. – DOI: 10.1002/dac.70324.
- [7] Bithas P.S. Hybrid FSO/RF Communications in Space-Air-Ground Integrated Networks: A Reduced Overhead Link Selection Policy / P.S. Bithas, H.E. Nistazakis, A. Katsis, L. Yang // Electronics. – 2024. – Vol. 13. – No. 4. – Art. 806. – DOI: 10.3390/electronics13040806.
- [8] Razrabotka karty primenimosti atmosfernoj opticheskoj svyazi na ob'ektah atomnoj energetiki Rossijskoj Federacii / S.YU. Kazancev, M.V. Sapozhnikov, D.N. Terekhin // YAdernaya fizika i inzhiniring. – 2025. – T. 16. – № 1. – S. 5–12. – DOI: 10.56304/S2079562924060162.
- [9] Lebedev I.V. Metody mashinnogo obucheniya v prognozirovanii vremeni dostupnosti atmosferyh opticheskijh linij svyazi na osnove mnogoletnih dannyh o sostoyanii atmosfery [Elektronnyj resurs] // Vestnik nauki. – 2025. – № 3(84). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-mashinnogo-obucheniya-v-prognozirovanii-vremeni-dostupnosti-atmosferyh-opticheskijh-linij-svyazi-na-osnove-mnogoletnih> (date of access:28.03.2026).
- [10] Sapozhnikov M.V. Metodika ocenki poter', obuslovlennyh atmosfernoj turbulentnost'yu v kvantovom kanale svyazi s KRK / M.V. Sapozhnikov, YU.B. Mironov, S.YU. Kazancev //

- Elektrosvyaz'. – 2025. – № 8. – S. 60–69. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.70.8.007.
- [11] Kruse P.W. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection / P.W. Kruse, L.D. McGlauchlin, R.B. McQuistan. – New York : Wiley, 1962. – 448 p.
- [12] Kim I.I. Comparison of Laser Beam Propagation at 785 nm and 1550 nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications / I.I. Kim, B. McArthur, E.J. Korevaar // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4214. – P. 26–37. – DOI: 10.1117/12.417512.
- [13] RISC-V Architecture Overview [Elektronnyj resurs] // RISC-V International. – URL: <https://riscv.org> (date of access: 22.01.2026).
- [14] LightPointe [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.lightpointe.com/> (date of access: 04.03.2026).
- [15] CableFree [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.cablefree.net/> (date of access: 13.02.2026).
- [16] MOSTCOM [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://mactkom.ru/> (date of access: 15.01.2026).
- [17] Cisco (Viptela) [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.cisco.com> (date of access: 15.01.2026).
- [18] Fortinet. [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.fortinet.com/> (date of access: 15.01.2026).
- [19] VMware (Velocloud). [Elektronnyj resurs] – URL: <https://www.vmware.com/> (date of access: 15.01.2026).
- [20] iMaster NCE [Elektronnyj resurs] // Huawei. – URL: <https://e.huawei.com/en/products/network-analysis> (date of access: 19.01.2026).
- [21] Network Services Platform (NSP) [Elektronnyj resurs] // Nokia. – URL: <https://www.nokia.com/ip-networks/network-services-platform/> (date of access: 24.01.2026).
- [22] Network Monitoring Solutions [Elektronnyj resurs] // SolarWinds. – URL: <https://www.solarwinds.com/solutions/network-solutions> (date of access: 18.02.2026).
- [23] HAWK – Optical Communication Terminal for Airborne and Ground Operations [Elektronnyj resurs] // Mynaric. – URL: <https://mynaric.com/products/hawk/> (дата обращения: 13.02.2026).
- [24] Products [Электронный ресурс] // fSONA. – URL: <https://www.fsona.com/product.php?sec=2500e> (date of access: 22.02.2026).
- [25] Kutuzov D. Crossbar Switch Arbitration with Traffic Control for NoC / D. Kutuzov, A. Osovsky, D. Starov, O. Stukach, N. Maltseva, D. Surkov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, Russian Federation, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002976.
- [26] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2019661380 Rossijskaya Federaciya. Element kommutacii dlya kommunikacionnyh struktur vysokonagruzhenykh marshrutizatorov / D.V. Kutuzov, A.V. Osovskij, O.V. Stukach [i dr.] ; zayavitel' FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – № 2019660257 ; zayavl. 19.08.2019 ; opubl. 28.08.2019.
- [27] Kutuzov D. V., Osovskij A. V., Stukach O. V. Model' generacii i obrabotki trafika IoT paralelnymi kommutacionnymi sistemami // Vestnik SibGUTI. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-generatsii-i-obrabotki-trafika-iot-paralelnymi-kommutatsionnymi-sistemami> (date of access: 21.02.2026).
- [28] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2026614395 Rossijskaya Federaciya. Sistema modelirovaniya processa peredachi trafika v usloviyah nepreryvnogo obryva i vosstanovleniya kanalov svyazi / A.A. Sorokin, A.V. Osovskij, D.V. Kutuzov [i dr.] ; zayavitel' FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – Zayavl. 11.02.2026. – Opubl. 16.02.2026.
- [29] Ray P.P. A Review on TinyML: State-of-the-Art and Prospects // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34. – No. 4. – P. 1595–1623. – DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.11.019.
- [30] Heydari S. Tiny Machine Learning and On-Device Inference: A Survey of Applications, Challenges, and Future Directions // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – No. 10. – Art. 3191. – DOI: 10.3390/s25103191.
- [31] Lapčák M. Investigation of Machine Learning Methods for Prediction of Measured Values of Atmospheric Channel for Hybrid FSO/RF System / M. Lapčák, E. Ovseník, J. Oravec, N. Zdravecký // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 524. – DOI: 10.3390/photonics9080524.
- [32] Lionis, A., Peppas, K., Nistazakis, H. E., Tsigopoulos, A. D., & Cohn, K. Experimental Performance Analysis of an Optical Communication Channel over Maritime Environment. // Electronics – 2020. – Vol. 9. – No. 7. – Art. 1109. – DOI: 10.3390/electronics9071109
- [33] Pogoda i klimat [Elektronnyj resurs] // Climate-Data.org. – URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru> (date of access: 27.02.2026).
- [34] Formanek L. Advanced System for Remote Updates on ESP32-Based Devices Using Over-the-Air Update Technology / L. Formanek, M. Kubascik, O. Karpis, P. Kolok // Computers. – 2025. – Vol. 14. – No. 12. – Art. 531. – DOI: 10.3390/computers14120531.
- [35] Razvitie sredstv paralel'noj kommutacii v sistemah svyazi 5G / D.V. Kutuzov, A.V. Osovskij, D.V. Starov, E.A. Motorina // Radiotekhnika. – 2019. – № 3. – S. 70–78.
- [36] Osovskij, A. V. Analiz i raschyot trafika v telekommunikacionnyh sistemah : uchebnoe posobie / A. V. Osovskij, N. S. Mal'ceva, D. V. Kutuzov ; FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – Astrahan' : Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. – 164 s. – ISBN 978-5-89154-739-1.

### Information about the authors

Alisheva Albina Ersainovna, postgraduate student at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [alisheva94@mail.ru](mailto:alisheva94@mail.ru) ORCID: 0009-0004-7359-9453

Maltseva Natalia Sergeevna, Cand. of Techn. Sci., Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: [maltsevans@mail.ru](mailto:maltsevans@mail.ru) ORCID: 0000-0001-9731-4281

Osovsky Alexey Viktorovich, Cand. of Techn. Sci., Associate Professor in the Communications Department at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [a\\_osovskiy@mail.ru](mailto:a_osovskiy@mail.ru), ORCID: 0000-0002-3174-9765

# Обзор методов искусственного интеллекта для прогнозирования трафика в сетях мобильной СВЯЗИ

Д.В. Кузьмин

Научный руководитель: А.В. Осовский

*Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия*

**Аннотация** – В статье анализируются современные подходы к прогнозированию трафика в беспроводных сетях связи с использованием методов искусственного интеллекта. Рассмотрены статистические методы и традиционные алгоритмы машинного обучения, включая авторегрессионную интегрированную модель скользящего среднего (ARIMA) с её усовершенствованными вариантами. Среди нейросетевых архитектур представлены рекуррентные нейронные сети (RNN), сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), рекуррентные блоки с затворами (GRU), свёрточные нейронные сети (CNN), глубокая модель N-BEATS для прогнозирования временных рядов, а также генеративная предобученная модель TimeGPT. Особое внимание уделено комбинированным решениям, интегрирующим выбор признаков и оптимизацию гиперпараметров. Проанализированы аспекты вычислительной нагрузки, энергоэффективности и адаптации моделей к среде периферийных вычислений (edge computing). Цель исследования – систематизировать современные тенденции для практического внедрения методик прогнозирования в телекоммуникационную инфраструктуру.

**Ключевые слова** – прогнозирование трафика сотовой связи, искусственный интеллект, ИИ, глубокое обучение, рекуррентные нейронные сети, LSTM, GRU, гибридные модели, TimeGPT, N-BEATS, системная инженерия нейросетевых архитектур, временные ряды, ARIMA, AutoML, графовые нейронные сети, мобильные сети 5G, IoT-трафик.

## ВВЕДЕНИЕ

Переход на технологии 5G и начало проектирования сетей 6G сопровождаются экспоненциальным ростом объёмов пользовательского трафика. По данным аналитического отчёта Cisco [1], уже к 2025 году ежемесячный объём данных, передаваемых мобильными пользователями, превысит 100 эксабайт (ЭБ). Основные причины этого роста – массовое внедрение «Интернета вещей» (IoT), увеличение числа

подключённых устройств и ужесточение требований к качеству обслуживания (QoS).

Оптимальное использование сетевых ресурсов возможно при наличии точных прогнозов трафика. Традиционные статистические методы, к примеру, модели авторегрессии скользящего среднего интегрированного ряда (ARIMA) и её варианты, не всегда эффективны при обработке нелинейных и нестационарных временных рядов, часто встречающихся в телекоммуникационных системах [2–6].

В последние несколько лет стало ясно, что методы глубокого обучения, основанные на использовании нейросетей, показывают хорошие результаты при работе с временными рядами [7–10].

Данная статья посвящена анализу современных методов прогнозирования сетевого трафика с применением ИИ. Основные задачи исследования: 1) классификация существующих подходов; 2) выявление их сильных и слабых сторон; 3) определение перспективных направлений для внедрения в телекоммуникационные сети.

## I. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР: ОТ СТАТИСТИКИ К НЕЙРОСЕТЯМ

История прогнозирования сетевого трафика (Рис. 1) началась в середине XX века с развитием теории массового обслуживания [11]. В 1970–1980-е годы главным направлением стали авторегрессионные методы, в числе которых выделяется модель ARIMA, разработанная Джорджем Боксом и Гвилимом Дженкинсом [12]. Её популярность объяснялась понятной интерпретацией и приемлемой вычислительной сложностью. Сложность сетевых конструкций в 1990–2000-е годы и поведение пользователей усложнились, что вызвало потребность в переходе на нелинейные методы. В то время получили развитие методы машинного обучения, в числе которых стоит отметить метод опорных векторов

(SVM) и алгоритмы деревьев решений [13]. Значительный прогресс в обработке временных рядов связан с использованием рекуррентных нейронных сетей, в частности с архитектурой LSTM, введённой Хохрайтером и Шмидхубером в 1997 году [14]. Это исследование, до сих пор лежащее в основе современных разработок [15, 16], заложило основы эффективного моделирования временных зависимостей. К 2010-м годам акцент сместился на гибридные решения, сочетающие статистические методы и нейросетевые технологии [17]. Параллельно развивались системы автоматической оптимизации гиперпараметров (AutoML), сокращающие потребность в ручной настройке [18].

В настоящее время (2020–2025 гг.) лидирующими являются трансформерные архитектуры, графовые нейросети (GNN) для анализа пространственно-временных корреляций и генеративные модели для решения проблемы дефицита данных [19–21].

Наиболее важными критериями стали энергоэффективность и интерпретируемость моделей, что определяет их практическую ценность [22].

Эволюция методов прогнозирования трафика наглядно представлена на Рис. 1, который иллюстрирует переход от классических статистических методов к современным гибридным нейросетевым архитектурам.

## II. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАФИКА В СОТОВЫХ СЕТЯХ

Современные подходы к прогнозированию трафика могут быть классифицированы по нескольким критериям (Табл. I).

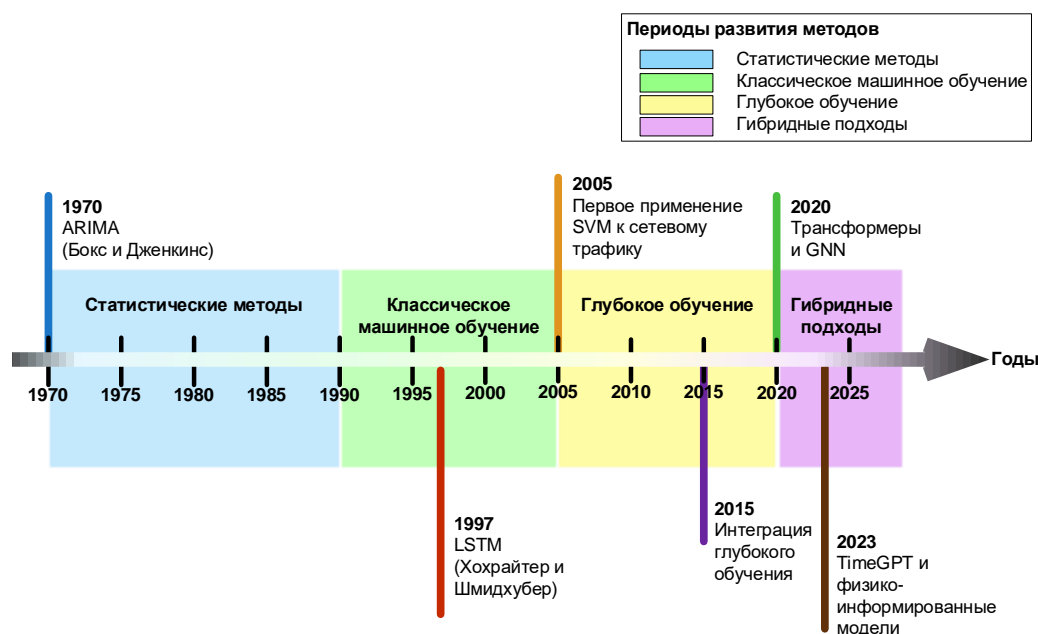


Рис. 1. Эволюция методов прогнозирования трафика в сотовых сетях

ТАБЛИЦА I  
КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАФИКА

Класс метода	Представители	Преимущества	Ограничения	Область применения
Статистические	ARIMA, SARIMA, экспоненциальное сглаживание	Интерпретируемость, низкая вычислительная сложность	Требуют стационарности, плохо моделируют нелинейные зависимости	Краткосрочное прогнозирование в стабильных сетях
Машинное обучение	SVM, Random Forest, Gradient Boosting	Способность к обработке нелинейных зависимостей	Не учитывают последовательную природу временных рядов	Прогнозирование с использованием внешних признаков
Глубокое обучение	LSTM, GRU, CNN, Transformers	Автоматическое извлечение признаков, высокая точность	Высокая вычислительная сложность, требуют больших объемов данных	Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование в динамичных сетях
Гибридные подходы	Комбинации статистических и нейросетевых моделей	Сочетание точности и устойчивости	Сложность разработки и настройки	Операторские сети с мультисервисной нагрузкой

### III. СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Разработка эффективных методик прогнозирования трафика требует системного подхода, охватывающего все этапы от сбора данных до внедрения модели в эксплуатацию. Выделяются следующие ключевые аспекты.

#### A. Предварительная обработка данных

Надёжность и точность прогноза напрямую зависят от того, насколько качественно подготовлены исходные данные. В рамках предобработки решаются три основные задачи. Первая – обнаружение аномалий (выбросов): используются гибридные схемы, где статистические методы вроде Z-score и IQR дополняются алгоритмами машинного обучения [23,24]. Вторая – заполнение пропусков: эффективно работают генеративно-сопоставительные сети (GAN) и LSTM, которые выполняют задачу восполнения пропущенных значений во временных последовательностях [25]. Третья – нормализация: для устойчивого обучения нейронных сетей применяют масштабирование, адаптированное к специфике сетевого трафика [26].

#### B. Отбор признаков

Для снижения размерности признакового пространства применяются несколько подходов. Информационные критерии (взаимная информация, энтропия) позволяют отбирать наиболее значимые признаки [27]. Нейросетевые автоэнкодеры эффективно уменьшают размерность, сохраняя информативность данных [28]. Дополнительно используется мультикорреляционный анализ, который учитывает не только связь признаков с целевой переменной, но и взаимозависимости между самими признаками [29].

#### C. Выбор архитектуры и настройка гиперпараметров

Правильный выбор архитектуры модели и её гиперпараметров критически важен для достижения оптимального баланса между точностью и вычислительной сложностью:

- *Горизонт прогноза:* один из ключевых факторов при выборе архитектуры. Для краткосрочного прогнозирования (до 6 часов) достаточно лёгких рекуррентных сетей (LSTM или GRU) – они дают хорошую точность при умеренных вычислительных затратах. Для долгосрочного прогноза (сутки и более) лучше подходят трансформеры с механизмами внимания или гибридные модели, способные улавливать отдалённые временные зависимости [30].

- *Пространственно-временное моделирование:* для 5G/6G особое внимание уделяется методам,

учитывающим взаимодействие между ячейками сети с помощью графовых нейронных сетей [31].

- *Оптимизация параметров:* ставится акцент на автоматизированные системы (AutoML, байесовская оптимизация) для настройки гиперпараметров моделей [32].



Рис. 2. Системная архитектура методики прогнозирования трафика

Комплексный подход к разработке методик прогнозирования иллюстрируется на Рис. 2, где представлена системная архитектура, охватывающая все этапы жизненного цикла модели.

#### IV. ТИПОЛОГИЯ ТРАФИКА И СПЕЦИФИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Одной из ключевых проблем в разработке универсальных методик прогнозирования является гетерогенность современного сетевого трафика. Можно

выделить несколько основных типов трафика, каждый из которых обладает уникальными характеристиками и предъявляет специфические требования к методам прогнозирования. На Рис. 3 представлена визуализация распределения типов трафика по ключевым параметрам.

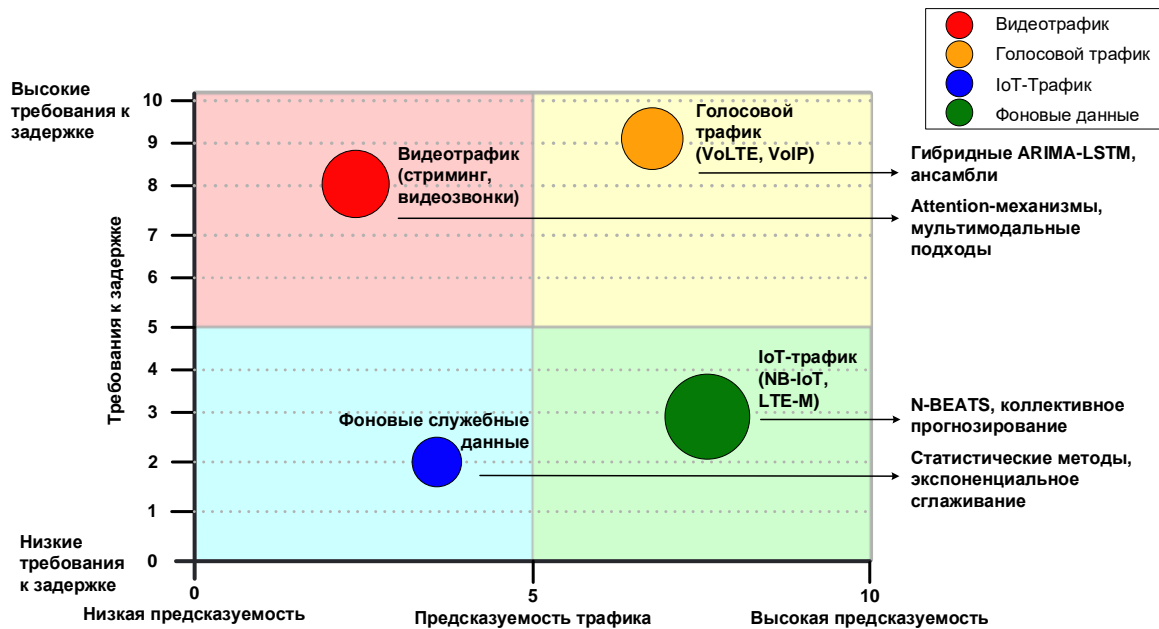


Рис. 3. Характеристики различных типов сетевого трафика

##### A. Видеотрафик (стриминг, видеозвонки)

Видеотрафик отличается высокой интенсивностью, нелинейными паттернами активности и значительной зависимостью от внешних факторов, таких как время суток и происходящие события. Для прогнозирования этого типа трафика наиболее эффективными являются:

- *Механизмы внимания (attention mechanisms)*: в моделях LSTM и трансформеров, которые позволяют выделять наиболее значимые временные интервалы [33].
- *Мультимодальные подходы*, объединяющие данные о календарных событиях и активности в социальных сетях для повышения точности прогнозов [34].

##### B. IoT трафик

Трафик от устройств IoT имеет свои особенности: низкую интенсивность, высокую периодичность и предсказуемость. Для его прогнозирования предлагаются:

- *Модель N-BEATS* с адаптированной архитектурой, специально разработанной для обработки периодических сигналов [35].
- *Коллективные методы прогнозирования*, которые позволяют обрабатывать данные от множества

устройств одновременно с учётом их взаимосвязей [36].

##### C. Голосовой трафик и служебные данные

Голосовой трафик и служебные данные, такие как управление сетью и синхронизация, характеризуются стабильной интенсивностью и высокими требованиями к надежности прогнозов. Для этих типов трафика предпочтительны:

- *Гибридные статистико-нейросетевые модели*, сочетающие интерпретируемость ARIMA и точность LSTM [37].
- *Ансамблевые подходы*, повышающие устойчивость прогноза за счёт комбинирования результатов нескольких моделей [38].

#### V. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАФИКА

Анализ современных исследований выявляет несколько ключевых проблем и перспективных направлений развития методик прогнозирования трафика в сотовых сетях. На Рис.4 представлена визуализация интеграции этих направлений в единую методологию.

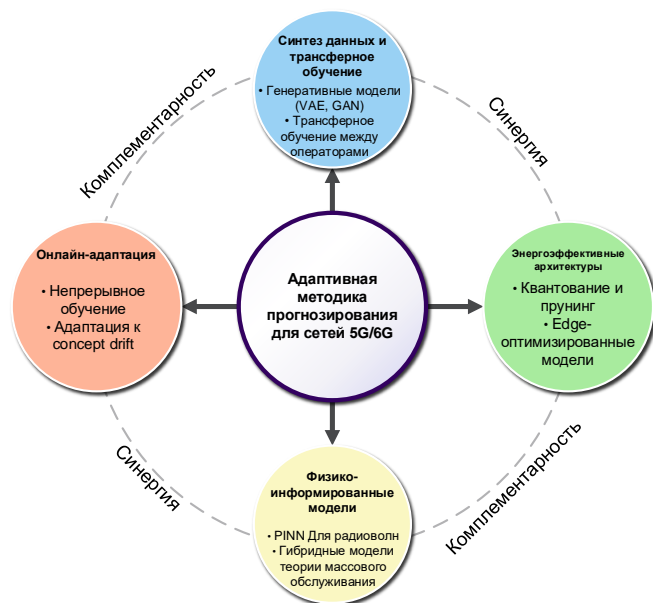


Рис. 4. Перспективные направления развития методик прогнозирования

#### А. Ограниченность данных

Проблема ограниченного доступа к реальным данным операторов связи, вызванная соображениями безопасности и коммерческой конфиденциальности, требует разработки альтернативных методов. Для преодоления этой проблемы предлагаются следующие подходы:

- **Синтез данных.** Один из путей решения проблемы дефицита реальных данных – их синтез с помощью генеративных моделей: вариационных автоэнкодеров (VAE), генеративно-состязательных сетей (GAN) и диффузионных моделей. Такие методы создают искусственные временные ряды, которые по статистическим свойствам (распределение, автокорреляция, сезонность) практически неотличимы от реального трафика и могут использоваться для обучения моделей [39,40].

- **Transfer learning (Трансферное обучение),** которое позволяет переносить знания, полученные на открытых или синтетических данных, на специфические условия конкретного оператора. Этот подход обеспечивает возможность адаптации моделей к уникальным характеристикам реальных сетей [41].

#### В. Энергоэффективность и вычислительная сложность

Требования к энергоэффективности и низкой задержке критичны для развертывания моделей прогнозирования в условиях edge-вычислений. Для решения этих задач проводятся исследования в следующих направлениях:

- **Квантование и оптимизация нейронных сетей.** Для работы на периферийных устройствах (edge computing) критичны энергопотребление и задержки.

Эффективный приём – квантование нейронных сетей (переход от 32-битных чисел к 8-битным или даже бинарным весам). Это резко снижает объём вычислений и памяти при незначительной (1–2%) потере точности. В сочетании с оптимизацией архитектуры такие методы делают модели пригодными для развертывания прямо на базовых станциях или устройствах пользователей [42].

- **Архитектурные оптимизации,** включая использование разделенных свёрток и рекуррентных блоков с адаптивной глубиной, направлены на улучшение производительности моделей. Такие подходы способствуют созданию более эффективных и экономичных решений [43].

#### С. Физико-информированные модели

Интеграция физических законов и доменных знаний в архитектуру нейронных сетей открывает новые перспективы для повышения точности и интерпретируемости прогнозов. В этом контексте выделяются:

- **Перспективное направление – физико-информированные нейронные сети (PINN).** В отличие от data-driven («управляемые данными») / «основанные исключительно на данных») моделей, PINN включают в функцию потерь не только ошибку на данных, но и остатки дифференциальных уравнений (например, описывающих затухание радиоволн или распределение нагрузки в соте). Благодаря этому модель лучше обобщает на нетипичные ситуации и требует меньше обучающих данных. Для сотовых сетей PINN позволяют прогнозировать трафик с учётом реального расположения базовых станций, рельефа и помех [44].

- **Гибридные модели,** сочетающие машинное обучение с традиционными методами теории массового обслуживания. Такой подход обеспечивает баланс между гибкостью машинного обучения и структурированностью традиционных методов, что способствует созданию более надежных и точных моделей [45].

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый систематический анализ исследований в области прогнозирования трафика [46] в сотовых сетях выявил ключевые тенденции и направления развития. Наблюдается переход от традиционных статистических методов к более сложным гибридным архитектурам, объединяющим преимущества машинного обучения, глубокого обучения и методов обработки сигналов. Эффективность прогнозирования существенно зависит от типа трафика (видеопотоки, данные IoT, голосовые сервисы, служебные сообщения), что требует разработки специализированных методик. Успешное применение методик определяется не только выбором модели, но и качеством предобработки данных, отбором признаков

и оптимизацией гиперпараметров – эти аспекты играют критическую роль. Современные исследования всё чаще акцентируют внимание на энергоэффективности моделей, их вычислительной сложности и возможности работы в условиях edge-вычислений, что особенно важно для мобильных устройств и сетей с ограниченными ресурсами.

Перспективные направления развития включают интеграцию генеративных моделей для решения проблем ограниченности данных, разработку энергоэффективных архитектур для edge-устройств, применение физико-информированных моделей для повышения интерпретируемости и развитие методов онлайн-адаптации к изменениям паттернов трафика.

Дальнейшие исследования следует направить на создание комплексных методик, сочетающих высокую точность с практической применимостью, с учётом специфики стандартов 6G и возможностей квантовых коммуникаций.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cisco. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. San Jose: Cisco Systems, 2020.
- [2] Alawe I., Ksentini A., Hadjadj-Aoul Y., Bertin P. Improving Traffic Forecasting for 5G Core Network Scalability: A Machine Learning Approach // *IEEE Network*. – 2018. – Vol. 32. – No. 6. – P. 42–49.
- [3] Zhang C., Patras P. Long-Term Mobile Traffic Forecasting Using Deep Spatio-Temporal Neural Networks // *Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*. – 2018. – P. 231–240.
- [4] Анализ и прогнозирование трафика современных телекоммуникационных систем на основе методов искусственного интеллекта / Д. В. Кутузов, А. В. Осовский, Д. В. Старов [и др.] // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2024. – № 1. – С. 73–87. – DOI 10.24143/2072-9502-2024-1-73-87.
- [5] Свойства трафика видеоконференций 5G и его прогнозирование методами искусственного интеллекта / Д. В. Кутузов, А. В. Осовский, Н. С. Мальцева, С. В. Мартынов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2025. – № 1. – С. 103–116. – DOI 10.24143/2072-9502-2025-1-103-116.
- [6] Управление трафиком системы обработки данных на основе NoC для информационно-измерительной сети IoT / Д. В. Кутузов, А. В. Осовский, Д. В. Старов, С. В. Мартынов // *Датчики и системы*. – 2025. – № 5(283). – С. 8–14. – DOI 10.24412/1992-7185-2025-5-8-14.
- [7] Zhang C., Patras P., Haddadi H. Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019. – Vol. 21. – No. 3. – P. 2224–2287.
- [8] Lopez-Martin M. Novel applications of Machine Learning to Network Traffic Analysis and Prediction: PhD Thesis. – Valladolid: University of Valladolid, 2019.
- [9] Hou Y., Zheng X., Han C., Wei W., Scherer R., Polap D. Deep Learning Methods in Short-Term Traffic Prediction: A Survey // *Information Technology and Control*. – 2022. – Vol. 51. – No. 1. – P. 139–157.
- [10] Trinh H. D., Giupponi L., Dini P. Mobile Traffic Prediction from Raw Data Using LSTM Networks // *IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. – 2018. – P. 1827–1832.
- [11] Zukerman M. Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models // *arXiv preprint arXiv:1307.2968*. – 2013.
- [12] Box G., Jenkins G., Reinsel G., Ljung G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2015.
- [13] Ferreira G. O., Ravazzi C., Dabbene F., Calafiore G. C., Fiore M. Forecasting Network Traffic: A Survey and Tutorial With Open-Source Comparative Evaluation // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 9691–9723.
- [14] Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // *Neural Computation*. – 1997. – Vol. 9. – No. 8. – P. 1735–1780.
- [15] Greff K., Srivastava R. K., Koutník J., Steunebrink B. R., Schmidhuber J. LSTM: A search space odyssey // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2017. – Vol. 28. – No. 10. – P. 2222–2232.
- [16] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, – 2016.
- [17] Feng J., Chen X., Gao R., Zeng M., Li Y. DeepTP: An End-to-End Neural Network for Mobile Cellular Traffic Prediction // *IEEE Network*. – 2018. – Vol. 32. – No. 6. – P. 108–115.
- [18] He X., Zhao K., Chu X. AutoML: A survey of the state-of-the-art // *Knowledge-Based Systems*. – 2021. – Vol. 212. – Article ID 106622.
- [19] Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998–6008.
- [20] Velickovic P., Cucurull G., Casanova A., Romero A., Lio P., Bengio Y. Graph attention networks // *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. – 2018.
- [21] Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative Adversarial Networks // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. – 2014. – Vol. 27. – P. 2672–2680.
- [22] Strubell E., Ganesh A., McCallum A. Energy and policy considerations for deep learning in NLP // *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*. – 2019. – P. 3645–3650.
- [23] Wu Y., Dai H. N., Tang H. Graph Neural Networks for Anomaly Detection in Industrial Internet of Things // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2022. – Vol. 9. – No. 12. – P. 9214–9231.
- [24] Zhao Z., Chen W., Wu X., Chen P. C. Y., Liu J. LSTM network: a deep learning approach for short-term traffic forecast // *IET Intelligent Transport Systems*. – 2017. – Vol. 11. – No. 2. – P. 68–75.
- [25] Che Z., Purushotham S., Cho K., Sontag D., Liu Y. Recurrent Neural Networks for Multivariate Time Series with Missing Values // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – Article ID 6085.
- [26] Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift // *ICML*. – 2015. – P. 448–456.
- [27] Chandrashekar G., Sahin F. A survey on feature selection methods // *Computers & Electrical Engineering*. – 2014. – Vol. 40. – No. 1. – P. 16–28.
- [28] Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. Reducing the dimensionality of data with neural networks // *Science*. – 2006. – Vol. 313. – №. 5786. P. 504–507.
- [29] Zhang J., Zheng Y., Qi D. Deep Spatio-Temporal Residual Networks for Citywide Crowd Flows Prediction // *AAAI*. – 2017. – P. 1655–1661.
- [30] Lai G., Chang W. C., Yang Y., Liu H. Modeling Long- and Short-Term Temporal Patterns with Deep Neural Networks // *SIGIR*. – 2018. – P. 95–104.
- [31] Мартынов С., Осовский А., Кутузов Д. Стандарты сетей связи 5G/5G-Advanced для цифровой трансформации железных дорог и развития интеллектуальных транспортных систем // *Системная инженерия и инфокоммуникации*. – 2026. – №. 1. – С. 40–51.
- [32] Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization // *Journal of Machine Learning Research*. – 2012. – Vol. 13. – P. 281–305.
- [33] Стукач О., Ершов И., Кутузов Д. LSTM-модель потребления тепловой энергии в многоквартирном жилом здании // *Системная инженерия и инфокоммуникации*. – 2025. – №. 4. – С. 11–14.
- [34] Zhang J., Zheng Y., Qi D., Li R., Yi X. DNN-Based Prediction Model for Spatio-Temporal Data // *Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. – 2016. – Article No. 92.

- [35] Oreshkin B.N., Carpo D., Chapados N., Bengio Y. N-BEATS: Neural basis expansion analysis for interpretable time series forecasting // ICLR. 2020.
- [36] Lim W. Y. B., Luong N. C., Hoang D. T., Jiao Y., Liang Y. C., Yang Q., Niyato D., Miao C. Federated Learning in Mobile Edge Networks: A Comprehensive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2020. – Vol. 22. – №. 3. – P. 2031–2063.
- [37] Oliveira J. F. L., Silva E. G., Mattos Neto P. S. G. A Hybrid System Based on Dynamic Selection for Time Series Forecasting // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2022. – Vol. 33. – №. 8. – P. 3251–3263.
- [38] Bandara K., Bergmeir C., Hewamalage H. LSTM-MSNet: leveraging forecasts on sets of related time series with multiple seasonal patterns // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2021. – Vol. 32. – №. 4. – P. 1586–1599.
- [39] Song J., Meng C., Ermon S. Denoising diffusion implicit models // ICLR. 2021.
- [40] Kingma D. P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2014.
- [41] Pan S. J., Yang Q. A Survey on Transfer Learning // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2010. – Vol. 22. – №. 10. – P. 1345–1359.
- [42] Jacob B., Kligys S., Chen B., Zhu M., Tang M., Howard A., Adam H., Kalenichenko D. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference // CVPR. – 2018. – P. 2704–2713.
- [43] Hasani R. M., Lechner M., Amini A., Rus D., Grosu R. Liquid time-constant networks // AAAI. – 2021. – Vol. 35. – No. 9. – P. 7657–7666.
- [44] Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – P. 686–707.
- [45] Fu M., Wang P., Wang Z., Li Z. Deep Learning for Network Traffic Prediction: An Overview // IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC). – 2023. – P. 665–671.
- [46] Осовский, А. В. Анализ и расчёт трафика в телекоммуникационных системах : учебное пособие / А. В. Осовский, Н. С. Мальцева, Д. В. Кутузов ; ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – Астрахань : Астраханский государственный технический университет, 2022. – 164 с. – ISBN 978-5-89154-739-1.

### Информация об авторах

Кузьмин Дмитрий Васильевич, магистрант направления подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [diman\\_k30rus@mail.ru](mailto:diman_k30rus@mail.ru)

Осовский Алексей Викторович – к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, [a\\_osovskiy@mail.ru](mailto:a_osovskiy@mail.ru), ORCID: 0000-0002-3174-9765

### A Review of Artificial Intelligence Methods for Traffic Forecasting in Mobile Networks

D.V. Kuzmin

Academic advisor: A.V. Osovsky

Astrakhan State Technical University, Astrakhan,  
Russia

**Abstract** – The article analyzes modern approaches to traffic forecasting in wireless communication networks using artificial intelligence methods. Statistical methods and traditional machine learning algorithms are reviewed, including the autoregressive integrated moving average (ARIMA) model with its improved variants. Neural network architectures presented include recurrent neural networks (RNN), long short-term memory networks (LSTM), gated recurrent units (GRU), convolutional neural networks (CNN), the deep N-BEATS model for time series forecasting, and the generative pre-trained TimeGPT model. Special attention is paid to combined solutions integrating feature selection and hyperparameter optimization. The aspects of computational load, energy efficiency, and model adaptation to edge computing are analyzed. The purpose of the study is to systematize current trends for the practical implementation of forecasting techniques in telecommunications infrastructure.

**Keywords** – cellular traffic forecasting, artificial intelligence, AI, deep learning, recurrent neural networks, LSTM, GRU, hybrid models, TimeGPT, N-BEATS, system engineering of neural network architectures, time series, ARIMA, AutoML, graph neural networks, 5G mobile networks, IoT traffic.

### REFERENCES

- [1] Cisco. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. San Jose: Cisco Systems, 2020.
- [2] Alawe I., Ksentini A., Hadjadj-Aoul Y., Bertin P. Improving Traffic Forecasting for 5G Core Network Scalability: A Machine Learning Approach // IEEE Network. 2018. Vol. 32. No. 6. P. 42–49.
- [3] Zhang C., Patras P. Long-Term Mobile Traffic Forecasting Using Deep Spatio-Temporal Neural Networks // Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2018. P. 231–240.
- [4] Analiz i prognozovanie trafika sovremennyh telekommunikacionnyh sistem na osnove metodov iskusstvennogo intellekta / D. V. Kutuzov, A. V. Osovskij, D. V. Starov [i dr.] // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2024. – № 1. – S. 73-87. – DOI 10.24143/2072-9502-2024-1-73-87.
- [5] Svoystva trafika videokonferencij 5G i ego prognozovanie metodami iskusstvennogo intellekta / D. V. Kutuzov, A. V. Osovskij, N. S. Mal'ceva, S. V. Martynov // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2025. – № 1. – S. 103-116. – DOI 10.24143/2072-9502-2025-1-103-116.
- [6] Upravlenie trafikom sistemy obrabotki dannyh na osnove NoC dlya informacionno-izmeritel'noi seti IoT / D. V. Kutuzov, A. V. Osovskij, D. V. Starov, S. V. Martynov // Datchiki i sistemy. – 2025. – № 5(283). – S. 8-14. – DOI 10.24412/1992-7185-2025-5-8-14.
- [7] Zhang C., Patras P., Haddadi H. Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21. No. 3. P. 2224–2287.
- [8] Lopez-Martin M. Novel applications of Machine Learning to Network Traffic Analysis and Prediction: PhD Thesis. Valladolid: University of Valladolid, 2019.
- [9] Hou Y., Zheng X., Han C., Wei W., Scherer R., Polap D. Deep Learning Methods in Short-Term Traffic Prediction: A Survey // Information Technology and Control. 2022. Vol. 51. No. 1. P. 139–157.
- [10] Trinh H. D., Giupponi L., Dini P. Mobile Traffic Prediction from Raw Data Using LSTM Networks // IEEE 29th Annual International

- Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2018. P. 1827–1832.
- [11] Zukerman M. Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models // arXiv preprint arXiv:1307.2968. 2013.
- [12] Box G., Jenkins G., Reinsel G., Ljung G. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2015.
- [13] Ferreira G. O., Ravazzi C., Dabbene F., Calafiore G. C., Fiore M. Forecasting Network Traffic: A Survey and Tutorial With Open-Source Comparative Evaluation // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 9691–9723.
- [14] Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9. No. 8. P. 1735–1780.
- [15] Greff K., Srivastava R. K., Koutník J., Steunebrink B. R., Schmidhuber J. LSTM: A search space odyssey // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2017. Vol. 28. No. 10. P. 2222–2232.
- [16] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016.
- [17] Feng J., Chen X., Gao R., Zeng M., Li Y. DeepTP: An End-to-End Neural Network for Mobile Cellular Traffic Prediction // IEEE Network. 2018. Vol. 32. No. 6. P. 108–115.
- [18] He X., Zhao K., Chu X. AutoML: A survey of the state-of-the-art // Knowledge-Based Systems. 2021. Vol. 212. Article ID 106622.
- [19] Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS). 2017. Vol. 30. P. 5998–6008.
- [20] Velickovic P., Cucurull G., Casanova A., Romero A., Lio P., Bengio Y. Graph attention networks // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2018.
- [21] Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative Adversarial Networks // Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS). 2014. Vol. 27. P. 2672–2680.
- [22] Strubell E., Ganesh A., McCallum A. Energy and policy considerations for deep learning in NLP // Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). 2019. P. 3645–3650.
- [23] Wu Y., Dai H. N., Tang H. Graph Neural Networks for Anomaly Detection in Industrial Internet of Things // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. No. 12. P. 9214–9231.
- [24] Zhao Z., Chen W., Wu X., Chen P. C. Y., Liu J. LSTM network: a deep learning approach for short-term traffic forecast // IET Intelligent Transport Systems. 2017. Vol. 11. No. 2. P. 68–75.
- [25] Che Z., Purushotham S., Cho K., Sontag D., Liu Y. Recurrent Neural Networks for Multivariate Time Series with Missing Values // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Article ID 6085.
- [26] Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift // ICML. 2015. P. 448–456.
- [27] Chandrashekar G., Sahin F. A survey on feature selection methods // Computers & Electrical Engineering. 2014. Vol. 40. No. 1. P. 16–28.
- [28] Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. Reducing the dimensionality of data with neural networks // Science. 2006. Vol. 313. No. 5786. P. 504–507.
- [29] Zhang J., Zheng Y., Qi D. Deep Spatio-Temporal Residual Networks for Citywide Crowd Flows Prediction // AAAI. 2017. P. 1655–1661.
- [30] Lai G., Chang W. C., Yang Y., Liu H. Modeling Long- and Short-Term Temporal Patterns with Deep Neural Networks // SIGIR. 2018. P. 95–104.
- [31] Martynov S., Osovskij A., Kutuzov D. Standarty setej svyazi 5G/5G-Advanced dlya cifrovoj transformacii zheleznyh dorog i razvitiya intellektual'nyh transportnyh sistem //Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii. – 2026. – №. 1. – S. 40-51.
- [32] Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization // Journal of Machine Learning Research. 2012. Vol. 13. P. 281–305.
- [33] Stukach O., Ershov I., Kutuzov D. LSTM-model' potrebleniya teplovoj energii v mnogoetazhnom zhilom zdanii //Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii. – 2025. – №. 4. – S. 11-14.
- [34] Zhang J., Zheng Y., Qi D., Li R., Yi X. DNN-Based Prediction Model for Spatio-Temporal Data // Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. 2016. Article No. 92.
- [35] Oreshkin B. N., Carpow D., Chapados N., Bengio Y. N-BEATS: Neural basis expansion analysis for interpretable time series forecasting // ICLR. 2020.
- [36] Lim W. Y. B., Luong N. C., Hoang D. T., Jiao Y., Liang Y. C., Yang Q., Niyato D., Miao C. Federated Learning in Mobile Edge Networks: A Comprehensive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 22. No. 3. P. 2031–2063.
- [37] Oliveira J. F. L., Silva E. G., Mattos Neto P. S. G. A Hybrid System Based on Dynamic Selection for Time Series Forecasting // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2022. Vol. 33. No. 8. P. 3251–3263.
- [38] Bandara K., Bergmeir C., Hewamalage H. LSTM-MSNet: leveraging forecasts on sets of related time series with multiple seasonal patterns // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol. 32. No. 4. P. 1586–1599.
- [39] Song J., Meng C., Ermon S. Denoising diffusion implicit models // ICLR. 2021.
- [40] Kingma D. P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2014.
- [41] Pan S. J., Yang Q. A Survey on Transfer Learning // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2010. Vol. 22. No. 10. P. 1345–1359.
- [42] Jacob B., Kligys S., Chen B., Zhu M., Tang M., Howard A., Adam H., Kalenichenko D. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference // CVPR. 2018. P. 2704–2713.
- [43] Hasani R. M., Lechner M., Amini A., Rus D., Grosu R. Liquid time-constant networks // AAAI. 2021. Vol. 35. No. 9. P. 7657–7666.
- [44] Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
- [45] Fu M., Wang P., Wang Z., Li Z. Deep Learning for Network Traffic Prediction: An Overview // 2023 IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC). 2023. P. 665–671.
- [46] Osovskij, A. V. Analiz i raschyot trafika v telekommunikacionnyh sistemah : uchebnoe posobie / A. V. Osovskij, N. S. Mal'ceva, D. V. Kutuzov ; FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – Astrahan' : Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. – 164 s. – ISBN 978-5-89154-739-1.

#### Information about the authors

Kuzmin Dmitry Vasilyevich, Master's student in the Infocommunication Technologies and Communication Systems program at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [diman\\_k30rus@mail.ru](mailto:diman_k30rus@mail.ru)

Osovsky Alexey Viktorovich, Cand. of Techn. Sci., Associate Professor in the Communications Department at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, [a\\_osovskiy@mail.ru](mailto:a_osovskiy@mail.ru), ORCID: 0000-0002-3174-9765

# Особенности расчёта предельно допустимых потерь мощности сигнала в системах мобильной связи

О.Н. Пицин, Е.И. Иванова

*Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия*

**Аннотация** - рассматриваются особенности расчёта максимально допустимых потерь мощности радиосигнала с обоснованием каждого слагаемого для различных систем сотовой связи: 2G, 3G и 4G. В работе также рассматривается задача представления модели расчёта энергетического бюджета радиoliniи в универсальном виде для использования в образовательном процессе в российских учреждениях высшего и среднего образования. Приводится подробное описание значений всех показателей формулы расчёта с описанием обоснования вариативности использования различных значений, опирающихся на различия используемых технологий в системах сотовой связи. Приводится пример расчёта «максимально допустимых потерь» в радиoliniях систем сотовой связи различных стандартов, и оценка безопасного расстояния размещения антенного оборудования. Моделирование зон радиопокрытия выполнено с опорой на экспериментальную модель, полученную авторами ранее для проведения расчётов затухания радиосигналов на расстояниях до 1000 м.

**Ключевые слова** - планирование сети сотовой связи, UMTS, 3G, 4G, LTE, энергетический бюджет радиoliniи, электромагнитная безопасность, предельно допустимый уровень мощности радиосигнала, модель расчёта затухания для расстояний до 1000 м, сотовая связь, мобильная связь, мобильный оператор T2.

## ВВЕДЕНИЕ

Для современного человека сотовая связь играет значительную роль в его жизни, и с каждым годом увеличивается спрос на услуги мобильных операторов. Одновременно с постоянным увеличением числа пользователей и потока данных, мобильные операторы развивают свои сети, проникают на новые для себя территории для предоставления своих услуг большому числу абонентов. Важным этапом развития любой системы связи является её предварительное

проектирование. Проект системы мобильной связи содержит в себе комплекс принятых решений по всем параметрам, влияющим на успешную его реализацию. В настоящей работе проведено исследование возможности организации системы мобильной связи на примере населённого пункта с. Татарская Башмаковка в Астраханской области, где услуги мобильного интернета развиты крайне слабо.

## 1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Село Татарская Башмаковка (Рис. 1) расположено в Астраханской области. Население преимущественно сельское, виды деятельности: производство зерновых, бобовых, кормовых, технических, масличных, эфиромасличных и иных сельскохозяйственных культур, а также овощеводство, садоводство и животноводство.

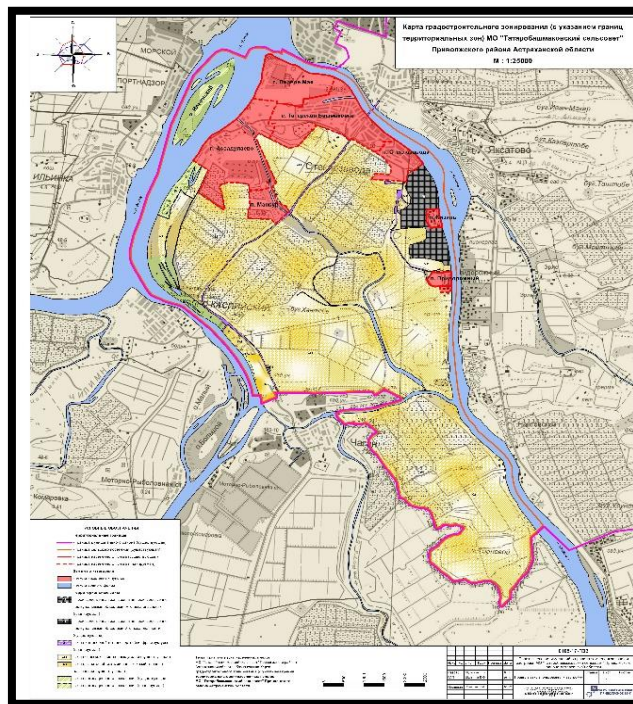


Рис.1 Территория с. Татарская Башмаковка

По переписи населения 2010 года количество жителей составляло около 2500 человек. По переписи населения в 2025 году количество жителей составляло уже более 5000 человек. Удвоение количества жителей в этом населенном пункте за указанный период говорит о необходимости расширения возможностей сети сотовой связи по предоставлению услуг в этом районе.

В настоящее время Российский сотовый оператор «Т2» в партнёрстве с «Ростелеком» реализует проект по развитию сети сотовой связи в Астраханской области. Ведутся работы по проектированию систем сотовой связи для этого оператора. На сегодняшний день, жители населённого пункта Татарская Башмаковка пока не обеспечены доступом в сеть сотового оператора «Т2». Нет доступа как к услугам голосовой связи, так и к услугам передачи данных. Проблемой оператора, является то, что лицензий на частотный диапазон систем второго поколения у оператора «Т2» на территории Астраханской области нет. Поэтому находясь в жёстких условиях конкуренции оператору необходимо проектировать такую сеть, которая могла бы стать конкурентной для существующих операторов сотовой связи «большой тройки» (ПАО «МегаФон», ПАО «МТС» и ПАО «ВымпелКом»).

Новому оператору предоставлена возможность развиваться только в диапазонах 2100 и 2600 МГц (в системах третьего (3G) и четвёртого (4G) поколений), имеющих значительно меньший радиус действия по сравнению с системами GSM (2G). Оператор вынужден решать свои задачи, используя лишь ту доступную часть ресурса, на которую у него имеется лицензия.

В современной научной литературе и учебниках опубликовано достаточное количество [1–3] материалов для проведения расчётов энергетического бюджета радиолинии, определяющие предельно возможные потери мощности сигнала, однако формулы расчёта имеют разный состав переменных и различные обозначения одних и тех же параметров [1–3]. Часть параметров описываются, как однозначные данные без пояснения их вариативности, отсюда возникают вопросы обоснованности использования тех или иных значений основных параметров расчёта энергетического бюджета радиолинии для различных систем (стандартов) сотовой радиосвязи.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, необходимо провести предварительную оценку возможной дальности распространения сигналов в диапазонах 3G и 4G сети сотовой связи в с. Татарская Башмаковка Астраханской области. Исследовать правила расчёта энергетического бюджета радиолинии для различных стандартов систем сотовой связи с обоснованием показателей, используемых в расчётах предельно допустимых потерь уровня мощности сигнала радиосвязи и

получить карту радиопокрытия расширения сети и предоставления услуг, как голосовой связи на территории населённого пункта, а также услуг по предоставлению высокоскоростного интернета.

## III. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ

У операторов связи «Т2» и «Ростелекома» отсутствуют лицензии на использование диапазонов частот 900 и 1800 МГц. Исходя из условий наличия лицензий у оператора «Т2» на территории Астраханской области, необходимо обеспечить и реализацию голосовых услуг на систему связи третьего поколения CDMA (Code Division Multiple Access — это множественный доступ с кодовым разделением каналов).

Для предоставления голосовых услуг необходимо использовать технологию CDMA (относится к сетям третьего поколения 3G), работающей на частоте 2100 МГц. Для предоставления высокоскоростного интернета в качестве конкурентной скорости передачи данных по сравнению с операторами «большой тройки» необходимо одновременно использовать и технологию LTE на частоте 2600 МГц.

Таким образом, в селе Татарская Башмаковка в Астраханской области необходимо будет построить сеть мобильной связи, опираясь на две технологии: CDMA (3G) и LTE (4G).

## IV. ВЫБОР АППАРАТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СЕТИ

Выбор оборудования базовых станций (БС) и антенно-фидерных устройств является ключевым фактором, определяющим архитектуру сети, возможности масштабирования и капитальные/эксплуатационные расходы.

В рамках исследования был проведен сравнительный анализ решений трех ведущих производителей: Huawei, ZTE и Ericsson. Сравнение производилось по критериям мультистандартности, поддерживаемым частотным диапазонам, выходной мощности, массогабаритным показателям и климатической устойчивости.

Результаты анализа технических характеристик показали:

- Huawei DBS5900 представляет собой современное распределенное решение с поддержкой всех необходимых стандартов (2G/3G/4G) и широкого спектра частот – 900/1700/2100/2300/2600 МГц. Обладает лучшими массогабаритными показателями (вес модуля всего 18 кг). Температурный диапазон эксплуатации ограничен нижней планкой в минус 20°C, что создает риски при эксплуатации в аномально холодные зимы. Также внедрение оборудования нового вендора потребует создания дублирующей

логистической цепочки и переобучения персонала оператора T2.

- ZTE B8200 поддерживает все необходимые стандарты с рабочими частотами 900/1800/2100/2600 МГц, имеет модульную и достаточно гибкую архитектуру, однако данное оборудование не рекомендуется к использованию в рамках развертывания новых сетей, так как оно не соответствует современным требованиям, а также в связи со скорым завершением заводской поддержки.

- Ericsson RBS 6601 поддерживает полный спектр стандартов с полосой частот 800/1700/1900/1700/2100, 2600 МГц. Архитектура позволяет еще более гибко конфигурировать приемопередатчики (до 6+6+6 GSM, или до 4+4+4 WCDMA, или 1+1+1 LTE с полосой 20 МГц). Оборудование оптимизировано для низкого энергопотребления. Важным преимуществом является расширенный температурный диапазон от -40°C до +55°C, обеспечивающий надежность в климатических условиях региона. Данное оборудование широко используется в уже существующих проектах компании T2.

На основании проведенного анализа для реализации проекта была выбрана платформа Ericsson RBS 6601. Выбор обоснован сочетанием высоких технических параметров (поддержка LTE 2600 МГц, климатическая устойчивость), большим числом доступных технических возможностей и экономической целесообразностью.

Для выбора антенн был проведен анализ продукции компаний Andrew, Powerwave и Huawei:

- Антенна Andrew CVVPX306R3 работает на двух диапазонах частот 790-960 и 1710-2690 МГц, обладает более низким коэффициентом усиления, а также меньшими возможностями регулировки наклона антенны по сравнению с антенным оборудованием от Huawei;

- Антенна Powerwave 7765 имеет узкую ширину диаграммы направленности и низкий коэффициент усиления.

В качестве оптимального решения выбрана антенна Huawei A264521R1v06 с диапазоном частот 1695-2690 МГц. Антенна обеспечивает высокий коэффициент усиления (20,5 dBi) и ширину диаграммы направленности 65° в горизонтальной плоскости, что является стандартом для трехсекторной конфигурации.

Таким образом, подобрано оптимальное оборудование, которое можно использовать в лицензированных для исследуемого оператора диапазонах частот и отвечающее задачам проектирования.

## V. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БЮДЖЕТА РАДИОЛИНИИ

Расчёт возможной дистанции (радиуса) обслуживания базовой станции необходимо начинать с

расчёта энергетического бюджета радиолинии. Определить энергетический бюджет радиолинии можно, используя актуальные модели расчёта затухания. Из энергетического бюджета можно вычислить предельную дальность распространения зоны уверенного приёма.

Зоной уверенного приёма будем считать зону связи (или предоставления услуги сотовой связи) с требуемым качеством, не смотря на воздействие возможных помех.

Энергетический бюджет радиолинии рассчитывается методом суммирования всех видов потерь и, например, предполагаемых или принимаемых усилений радиоканала, включая предполагаемые потери, в соответствии с [1]. Тогда расчет энергетического бюджета радиолинии производится по формуле:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - P_{RX} - B_{BODY} + G_{RX} - B_{fider} - IM - L_{slow}, \quad (1)$$

где  $L$  – максимально допустимое затухание радиолинии, дБ;

$P_{TX}$  – мощность передатчика, дБ;

$G_{TX}$  – коэффициент усиления передающей антенны, дБи;

$P_{RX}$  – чувствительность приемника, дБ;

$B_{BODY}$  – потери в теле абонента (актуально в большей степени только для систем GSM), дБ;

$G_{RX}$  – коэффициент усиления приемной антенны, дБи;

$B_{fider}$  – потери в фидере, дБ;

$IM$  – запас по интерференции, дБ;

$L_{slow}$  – запас на медленные замирания, берется равным 10,3 дБ [2].

В источнике [3] метод расчёта имеет вариативность, как в составе переменных, так и в их обозначении:

$$L_{MAPL} = P_{EIRP} - S_{Rx} + G_{RxA} - L_{RxF} - M_{Build} - M_{Int} - M_{Shade} + G_{HO} \quad (2)$$

где

$L_{MAPL}$  – максимально допустимые потери, дБ;

$P_{EIRP}$  – мощность передатчика, дБ;

$S_{Rx}$  – чувствительность приемника, дБ;

$G_{RxA}$  – коэффициент усиления антенны, дБи;

$L_{RxF}$  – потери в фидерном тракте, дБ;

$M_{Build}$  – запас на проникновение в помещение, дБ;

$M_{Int}$  – запас на помехи (то же самое, что и запас на интерференцию или интермодуляцию), дБ;

$M_{Shade}$  – запас на затенение (то же, что и запас на медленные замирания), дБ;

$G_{HO}$  – выигрыш от хэндовера (эстафетную передачу сигнала), дБ.

Как видно из двух представленных методов расчёта, в них имеется доля вариативности, которая требует обоснования.

Для использования в образовательном процессе в Российских учреждениях высшего и среднего образования предлагается, в обозначении переменных, использовать интуитивно понятную аббревиатуру с использованием стандартных международных латинских обозначений. Элементы затухания обозначать латинской буквой  $L$ , мощность и чувствительность –  $P$ , запас на затухание по дополнительным причинам –  $F$ , коэффициенты усиления –  $G$ .

Для расчёта энергетических потерь мощности сигнала в радиолиниях авторы предлагают представить формулы (1,2) в следующем виде:

$$L_{МДП} = P_{пер} - P_{пр} + G_{ант.пер} + G_{ант.пр} - L_{фидер} - (3) - F_{помещ} - F_{интерф} - F_{замирания} + G_{эст},$$

где

$L_{МДП}$  – максимально допустимые потери на всём участке радиотрассы, дБ;

$P_{пер}$  – мощность используемого передатчика, дБ. Как правило мощность передатчика указывается в Ваттах (Вт). Для проведения расчётов значения мощности необходимо перевести в дБ.

Согласно приказу Минкомсвязи РФ от 17.02.2010 №31, максимальная выходная мощность передатчика базовой станции UMTS для одной несущей имеет вид согласно данным, представленным в Табл. I [4].

ТАБЛИЦА I  
МАКСИМАЛЬНАЯ ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ОДНОЙ НЕСУЩЕЙ

Класс базовой станции	Эталонная чувствительность, дБм
Большого радиуса действия	38
Среднего радиуса действия	24-38
Локального радиуса действия	24

$P_{пр}$  – чувствительность приемника, дБ. Чувствительность приёмника в различных системах сотовой связи варьируется и может составлять

значения в среднем для стандарта GSM (2G) согласно данным, указанным в Табл. II [5].

ТАБЛИЦА II  
УРОВЕНЬ КОНТРОЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ AP

Диапазон частот	Класс AP	Уровень принимаемого полезного сигнала, дБм
GSM 900	Класс 4 и 5	-102
	Класс 2 и 3	-104
GSM 1800	Класс 1 и 2	-102
	Класс 3	-102

Уровень чувствительности в системах сотовой связи 3-го поколения оценивается на основании норм, указанных в Приказе Минкомсвязи России для UMTS [6], нормы представлены в Табл. III

ТАБЛИЦА III  
ЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЭТАЛОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА РАЗНЫХ КЛАССОВ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ СЕТИ ПОДВИЖНОЙ РАДИОТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ДИАПАЗОНЕ 2000 МГц

Класс базовой станции	Эталонная чувствительность, дБм
Большого радиуса действия	-121
Среднего радиуса действия	-111
Локального радиуса действия	-107

В системах 4-го поколения чувствительность приёмника зависит от используемой полосы частот, в соответствии с нормами для LTE [7,8], Табл.IV.

ТАБЛИЦА IV  
ПАРАМЕТРЫ ЭТАЛОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА БАЗОВОЙ СТАНЦИИ [7,8]

Полоса канала LTE, МГц	Значение эталонной чувствительности, дБм
1,4	106,8
3	103,0
5	101,5
10	101,5
15	101,5
20	101,5

Таким образом, расчет энергетических потерь мощности сигнала в радиолиниях необходимо производить исходя из задач проекта, возможностей оператора по предоставлению на каждом из участков проекта значений допустимой для использования полосы частот.

$G_{ант.пер}$  – коэффициент усиления антенны передатчика, дБ. Значение коэффициента усиления включается в расчёт из технических характеристик той

антенны, которая подобрана для проекта. Для антенн систем сотовой связи это, как правило, 15-22 дБи.

$G_{ант.пр}$  – коэффициент усиления антенны приемника, дБи. В среднем это значение одинаково у всех мобильных терминалов и составляет 2 дБи [1,3].

$L_{фидер}$  – потери в фидерном тракте, дБ. Потери в фидерном тракте необходимо предварительно рассчитать, исходя из протяжённости фидера (или высоты подвеса антенны, так как фидерный тракт, как правило, имеет протяжённость, равную расстоянию от передатчика до антенного оборудования) и погонного коэффициента затухания сигнала на 100 метров фидерного тракта (из технических характеристик используемого фидера). В настоящее время получил наибольшее распространение способ размещения радиомодуля непосредственно возле антенны без использования фидера, с тем, чтобы снизить затухание, вносимое фидерной линией, и радиомодуль (приёмопередатчик) могут размещать непосредственно вместе с антенной.

Размещение радиомодуля у антенного оборудования приводит к тому, что затуханием фидерного тракта служит только один разъём между радиомодулем и антенной, с потерями не более 0,3-0,5 дБ.

$F_{помещ}$  – запас на проникновение в помещение, дБ. Нормы запаса на проникновение сигнала в помещение указаны в [1,3] и соответствуют данным, приведённым в Табл. V.

ТАБЛИЦА V  
ЗНАЧЕНИЯ ЗАПАСА НА ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ LTE В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЗАСТРОЙКИ

Условия распространения радиоволн	Значения запаса на замирания, дБ
Плотная городская застройка, 9-24 этажа	22
Городская застройка средней плотности 5-9 этажей	17
Пригород 3-5 этажей	12
Сельской местности 1-2 этажа (в автомобиле)	8

$F_{интерф}$  – запас на интермодуляцию (интерференционные помехи или межканальная интерференция), дБ. Как правило, составляет 2,0 дБ [2,3].

$F_{замирания}$  – запас на медленные замирания, как правило указывают в размере 10,3 дБ [1,2].

$G_{эст}$  – выигрыш, получаемый от «мягкой» эстафетной передачи (выигрыш от хэндовера), дБ. Выигрыш от мягкого хэндовера для системы GSM не учитывается, так как в этой системе эстафетная передача сигнала происходит по «жесткому принципу»: жесткий хэндовер с отключением канала связи на период до 3

мс. Начиная с систем 3-го поколения (3G), выигрыш от мягкого хэндовера устанавливают от 2 до 5 дБ, чаще всего используется значение 2,5 дБ [1-3].

Таким образом, исходные данные для сетей третьего поколения:

$$\begin{aligned}
 P_{пер} &= 24\text{dBm} = -6\text{ дБ}; \\
 P_{пр} &= -107\text{ дБм} = -137\text{ дБ}; \\
 G_{ант.пер} &= 18\text{ дБи}; \\
 G_{ант.пр} &= 2\text{ дБи}; \\
 L_{фидер} &= 0,3\text{ дБ}; \\
 F_{помещ} &= 8\text{ дБ}; \\
 F_{интерф} &= 2\text{ дБ}; \\
 F_{замирания} &= 10,3\text{ дБ}; \\
 G_{эст} &= 2\text{ дБ}.
 \end{aligned}$$

Используя формулу (3), рассчитываем максимально допустимые потери для систем связи третьего поколения:

$$L_{МДП}(3G) = 132,4\text{ дБ}. \quad (4)$$

Модель затухания радиосигнала для систем 3-го и 4-го поколений построена на основе экспериментальных данных, рассмотрена в статье [9]. Модель отражает зависимость уровней сигнала на входе приёмного устройства от расстояния (до 1000 м):

$$L_{f_{2100\text{MHz}}} = 20,8 \cdot \log R + 67,8. \quad (5)$$

Приравняв формулу (5) к полученному значению максимально допустимых потерь для систем связи третьего поколения (4), определяем максимальную дальность распространения уверенного сигнала:

$$132,5 = 20,8 \cdot \log R + 67,8.$$

$$\log R = 3,11.$$

Тогда максимальная дальность распространения уверенного сигнала системы связи третьего поколения составит:

$$R \approx 1300\text{ м}.$$

Исходные данные для расчёта максимально допустимых потерь для систем связи 4-го поколения:

$P_{пер} = 23\text{dBm} = -7\text{ дБ}$  (максимальная мощность передатчика для систем LTE) [10];  
 $P_{пр} = -101,5\text{ дБм} = -131,5\text{ дБ};$

$$\begin{aligned}
 G_{ант.пер} &= 18\text{ дБи}; \\
 G_{ант.пр} &= 2\text{ дБи}; \\
 L_{фидер} &= 0,3\text{ дБ}; \\
 F_{помещ} &= 8\text{ дБ}; \\
 F_{интерф} &= 2\text{ дБ};
 \end{aligned}$$

$$F_{\text{затмирения}} = 10,3 \text{ дБ};$$

$$G_{\text{эст}} = 2 \text{ дБ}.$$

Используя формулу (3), рассчитываем максимально допустимые потери для систем связи четвёртого поколения:

$$L_{\text{МДП}}(4G) = 125,9 \text{ дБ}. \quad (6)$$

Приравняв формулу (5) к максимально допустимым потерям для систем сотовой связи четвёртого поколения (6), определяем максимальную дальность распространения уверенного сигнала:

$$125,9 = 20,8 \cdot \log R + 67,8;$$

$$\log R = 2,79.$$

Тогда максимальная дальность распространения уверенного сигнала для системы связи четвёртого поколения составит:

$$R \approx 617 \text{ м}.$$

Для визуализации на цифровой карте местности проводим расчёт и моделирование зоны радиопокрытия для каждого из стандартов, используя автоматизированный программный комплекс проектирования радиосвязи RPLS ONEGA [11].

## VI. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН РАДИОПОКРЫТИЯ

Установка базовых станций нового оператора будет целесообразна на уже существующих и эксплуатирующихся площадках операторов ПАО «МТС» и ПАО «МегаФон», а для улучшения качества сигнала дополнительно будет нужна ещё одна базовая станция с собственной площадкой (3 площадки на Рис.2). При выборе мест установки БС учитывается рассчитанное значение дальности связи.

Размещение станций 4-го поколения произведено на площадках совместно с базовыми станциями 3-го поколения, что позволяет обеспечить оптимальный доступ населения к услугам передачи данных на всей территории села Татарская Башмаковка (Рис.3).



Рис.2 Карта радиопокрытия сети сотовой связи с оценкой распределение уровня мощности поля для стандарта 3G

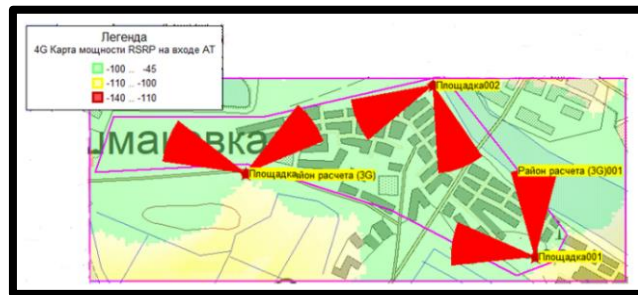


Рис. 3 Карта радиопокрытия, отражающая степень доступности уровня мощности поля при передаче данных для стандарта 4G

Для исследования вопросов электромагнитной безопасности для населения на территории данного населенного пункта необходимо оценить уровень опасности излучения радиоэлектронных средств (РЭС) и рассчитать расстояние, предельно допустимого уровня излучения антенн.

## VII. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

При проектировании сети в жилой зоне критически важным является соблюдение санитарных норм. Расчет плотности потока энергии (ППЭ) с опорой на предельно допустимые нормы для населения [12], производился по формуле:

$$P = \frac{P_{\text{пер}} \cdot G_{\text{ант}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (7)$$

где  $P$  - предельно допустимый уровень излучения, мкВт/см<sup>2</sup>;  $P_{\text{пер}}$  - мощность передатчика, Вт;  $G_{\text{ант}}$  - коэффициент усиления антенны, дБ;  $r$  - безопасное расстояние от излучателя антенны, м.

Безопасное расстояние  $r$ , на котором ППЭ не превышает нормативного значения 10 мкВт/см<sup>2</sup> (согласно СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 для населения при неподвижной диаграмме направленности антенны [12]), рассчитывается как:

$$r = \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} \cdot G_{\text{ант}}}{4 \cdot \pi \cdot P}}, \quad (8)$$

где предельно допустимый уровень для населения составляет:

$$P = 10 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} = 0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для антенн системы связи 3-го поколения расстояние составило:

$$r_{3G} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot 18}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1}} = 1,9 [\text{м}].$$

А для антенн системы связи 4-го поколения оно составило:

$$r_{4G} = \sqrt{\frac{0,2 \cdot 18}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1}} = 1,7 [м].$$

Таким образом, определена дистанция (зона ограничения) в створе антенны при постоянном её излучении для безопасного размещения антенного оборудования. В пределах указанной зоны действия пребывания населения не допускается. Поэтому необходимо иметь в виду, что при монтаже антенного оборудования рассчитанные значения дальности связи обязательно соблюдать для дальнейшего получения санитарного сертификата на коммерческую эксплуатацию оборудования базовых станций в с. Татарская Башмаковка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены особенности расчёта максимально допустимых потерь мощности радиосигнала для систем сотовой связи актуальных стандартов. Для оценки максимальной дальности распространения уверенного сигнала применена модель затухания радиосигнала для систем 3-го и 4-го поколений, построенная на основе экспериментальной модели, изложенной в статье [9].

Предложена формула расчёта энергетических потерь мощности сигнала в радиолиниях с интуитивно понятной аббревиатурой и использованием стандартных международных латинских обозначений.

Для организации зоны уверенной радиосвязи в с. Татарская Башмаковка с помощью автоматизированного комплекса проектирования и оптимизации радиосистем RPLS ONEGA получены карты радиопокрытия, показывающие распределения уровня мощности сигналов базовых станций. Они подтвердили необходимость установки 3-х базовых станций стандарта 3G и трёх базовых станция стандарта 4G.

Проведенная оценка электромагнитной обстановки показала, что нахождение человека в створе антенны на дистанции более 2-х метров является безопасным.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дюсенова, О. С. Исследование использования новых стандартов сотовой связи и широкополосного доступа LTE и WIGIG для предоставления услуг Triple Play / О. С. Дюсенова, О. Н. Пищин, Г. С. Павленко. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2013. — № 5 (52). — С. 45-49. — URL: <https://moluch.ru/archive/52/6793>. (дата обращения 31.03.2026)
- [2] Мищенко, В. Н. Сети радиодоступа систем сотовой радиосвязи с кодовым разделением каналов: учебно-методическое пособие / В. Н. Мищенко. — Минск: БГУИР, 2016. — 64 с. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/25510> (дата обращения 31.03.2026)
- [3] Варукина Л. Упражнение по планированию радиосетей LTE. URL: [https://www.mforum.ru/arc/20110520\\_LTE\\_RNP\\_Varukina\\_180511.pdf](https://www.mforum.ru/arc/20110520_LTE_RNP_Varukina_180511.pdf) (дата обращения 31.03.2021)
- [4] Приказ Министерства информационных технологий и связи РФ от 27 августа 2007 г. № 102 «Об утверждении Правил применения базовых станций и ретрансляторов систем подвижной радиотелефонной связи. Часть V. Правила применения оборудования базовых станций и ретрансляторов систем подвижной радиотелефонной связи стандарта UMTS с частотным дуплексным разносом и частотно-кодовым разделением радиоканалов, работающих в диапазоне частот 2000 МГц»
- [5] РД 45.187-2001. Руководящий документ отрасли. Абонентские радиостанции систем сотовой подвижной связи. Стандарта gsm 900/1800. Общие технические требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035410?ysclid=mnfxkr0np0569142605> (дата обращения 01.04.2026)
- [6] Приказ Минкомсвязи России от 17.02.2010 N 31 (ред. от 12.05.2015) Об утверждении Правил применения базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи. Часть V. Правила применения оборудования систем базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта UMTS с частотным дуплексным разносом и частотно-кодовым разделением радиоканалов (Зарегистрировано в Минюсте России 15.03.2010 N 16621) URL: <https://base.garant.ru/197787/> (дата обращения 02.04.2026)
- [7] Приказ Минкомсвязи России от 29.10.2018 N 572 Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ «Об утверждении Правил применения базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи. Часть VI. Правила применения базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта LTE и его модификации LTE-Advanced» (Зарегистрировано в Минюсте России 26.11.2018 N 52780) URL: [https://r-tel.ru/sitetemp/files/documents/regulations/572\\_29-10-2018.pdf](https://r-tel.ru/sitetemp/files/documents/regulations/572_29-10-2018.pdf) (дата обращения 02.04.2026)
- [8] Приказ Минкомсвязи России от 06.06.2011 N 128 (ред. от 22.06.2018) Об утверждении Правил применения абонентских терминалов сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта LTE (Зарегистрировано в Минюсте России 24.06.2011 N 21165) URL: <https://base.garant.ru/55171631/> (дата обращения 02.04.2026)
- [9] Пищин О. Н., Пузанков Д. С. Модели расчета распределения уровня мощности электромагнитного поля в системах подвижной радиосвязи для малых дистанций в летний период // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. №2. С. 111–119.
- [10] Приказ Минкомсвязи России от 06.06.2011 N 129 (ред. от 01.04.2016) Об утверждении Правил применения базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи. Часть VI. Правила применения оборудования систем базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта LTE (Зарегистрировано в Минюсте России 24.06.2011 N 21166) URL: <https://docs.cntd.ru/document/902285149?ysclid=mnhcf8tqo570975142> (дата обращения 02.04.2026)
- [11] Программный комплекс ONEPLAN RPLS-DB планирования и оптимизации подвижной и фиксированной связи (сетевая версия) Реестровая запись №8968 от 28.01.2021 URL: [https://reestr.digital.gov.ru/reestr/310318/?sphrase\\_id=9138421](https://reestr.digital.gov.ru/reestr/310318/?sphrase_id=9138421) (дата обращения 03.04.2026)
- [12] Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 09.06.2003 N 135 (ред. от 19.12.2007) О введении в действие Санитарных правил и нормативов - СанПиН 2.1.8./2.2.4.1383-03 (вместе с СанПиН 2.1.8./2.2.4.1383-03. 2.1.8. Физические факторы окружающей природной среды. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы, утв. Главным государственным

санитарным врачом РФ 09.06.2003) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 18.06.2003 N 4710) URL: <https://ekosf.ru/normativnye-dokumenty/em-polya/573-sanpin-2-2-4-1383-03/?ysclid=mnim37nn3z46468953> (дата обращения 03.04.2026)

### Информация об авторах

Пищин Олег Николаевич, к.т.н., доц., заведующий кафедрой «Связь», АГТУ, Астрахань, Россия, e-mail: [o.pishin@yandex.ru](mailto:o.pishin@yandex.ru)

Иванова Елена Ивановна, магистрант, АГТУ, Астрахань, Россия, e-mail: [elena.ivan03@mail.ru](mailto:elena.ivan03@mail.ru)

### Features of calculating the maximum allowable signal power loss in mobile communication systems

Oleg Pishchin, Elena Ivanova

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia*

**Abstract** - This paper examines the specifics of calculating maximum permissible radio signal power losses, with justification for each term for various cellular communication systems: 2G, 3G, and 4G. The paper also addresses the problem of presenting a model for calculating the energy budget of a radio link in a universal form for use in the educational process at Russian institutions of higher and secondary education. A detailed description of the values of all the parameters in the calculation formula is provided, with a description of the rationale for the variability of using various values based on the differences in the technologies used in cellular communication systems. An example of calculating the "maximum permissible losses" in radio links of cellular communication systems of various standards is given, along with an assessment of the safe distance for placing antenna equipment. Radio coverage areas are modeled using an experimental model previously obtained by the authors for calculating radio signal attenuation at distances of up to 1000 m.

**Keywords** – cellular network planning, UMTS, 3G, 4G, LTE, radio link energy budget, electromagnetic safety, maximum permissible radio signal power level, attenuation calculation model for distances up to 1000 m, cellular communications, mobile communications, mobile operator T2

### REFERENCES

- [1] Dyusenova, O. S. Issledovanie ispol'zovaniya novykh standartov sotovoy svyazi i shirokopolosnogo dostupa LTE i WIGIG dlya predostavleniya uslug Triple Play / O. S. Dyusenova, O. N. Pishchin, G. S. Pavlenko. — Tekst: neposredstvennyy // Molodoy uchenyy. — 2013. — № 5 (52). — S. 45-49. — URL: <https://moluch.ru/archive/52/6793>. (data obrashcheniya 31.03.2026)
- [2] Mishchenko, V. N. Seti radiodostupa sistem sotovoy radiosvyazi s kodovym razdeleniem kanalov: uchebno-metodicheskoe posobie / V. N. Mishchenko. — Minsk: BGUIR, 2016. — 64 s. URL: <https://libeloc.bsuir.by/handle/123456789/25510> (data obrashcheniya 31.03.2026)
- [3] Varukina L. Uprazhnenie po planirovaniyu radiosetey LTE. URL: [https://www.mforum.ru/arc/20110520\\_LTE\\_RNP\\_Varukina\\_180511.pdf](https://www.mforum.ru/arc/20110520_LTE_RNP_Varukina_180511.pdf) (data obrashcheniya 31.03.2021)
- [4] Prikaz Ministerstva informatsionnykh tekhnologij i svyazi RF ot 27 avgusta 2007 g. № 102 «Ob utverzhdenii Pravil primeneniya bazovykh stantsij i retranslyatorov sistem podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi. Chast' V. Pravila primeneniya oborudovaniya bazovykh stantsij i retranslyatorov sistem podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi standarta UMTS s chastotnym dupleksnym raznosom i chastotno-kodovym razdeleniem radiokanalov, rabotayushchikh v diapazone chastot 2000 MGts»
- [5] RD 45.187-2001. Rukovodnyashchij dokument otrasli. Abonentskie radiostantsii sistem sotovoy podvizhnoj svyazi. Standarta gsm 900/1800. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035410?ysclid=mnfxkr0np0569142605> (data obrashcheniya 01.04.2026)
- [6] Prikaz Minkomsvyazi Rossii ot 17.02.2010 N 31 (red. ot 12.05.2015) Ob utverzhdenii Pravil primeneniya bazovykh stantsij i retranslyatorov setey podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi. Chast' V. Pravila primeneniya oborudovaniya sistem bazovykh stantsij i retranslyatorov setey podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi standarta UMTS s chastotnym dupleksnym raznosom i chastotno-kodovym razdeleniem radiokanalov (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 15.03.2010 N 16621) URL: <https://base.garant.ru/197787/> (data obrashcheniya 02.04.2026)
- [7] Prikaz Minkomsvyazi Rossii ot 29.10.2018 N 572 Ministerstvo tsifrovogo razvitiya, svyazi i massovykh kommunikatsij RF "Ob utverzhdenii Pravil primeneniya bazovykh stantsij i retranslyatorov setey podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi. Chast' VI. Pravila primeneniya bazovykh stantsij i retranslyatorov setey podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi standarta LTE i ego modifikatsii LTE-Advanced" (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 26.11.2018 N 52780) URL: [https://r-tel.ru/sitetemp/files/documents/regulations/572\\_29-10-2018.pdf](https://r-tel.ru/sitetemp/files/documents/regulations/572_29-10-2018.pdf) (data obrashcheniya 02.04.2026)
- [8] Prikaz Minkomsvyazi Rossii ot 06.06.2011 N 128 (red. ot 22.06.2018) Ob utverzhdenii Pravil primeneniya abonentskikh terminalov setey podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi standarta LTE (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 24.06.2011 N 21165) URL: <https://base.garant.ru/55171631/> (data obrashcheniya 02.04.2026)
- [9] Pishchin O. N., Puzankov D. S. Modeli rascheta raspredeleniya urovnya moshchnosti elektromagnitnogo polya v sistemakh podvizhnoj radiosvyazi dlya malyx distantsij v letnij period // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2024. №2. S. 111-119.
- [10] Prikaz Minkomsvyazi Rossii ot 06.06.2011 N 129 (red. ot 01.04.2016) Ob utverzhdenii Pravil primeneniya bazovykh stantsij i retranslyatorov setey podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi. Chast' VI. Pravila primeneniya oborudovaniya sistem bazovykh stantsij i retranslyatorov setey podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi standarta LTE (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 24.06.2011 N 21166) URL: <https://docs.cntd.ru/document/902285149?ysclid=mnhcf8tqo570975142> (data obrashcheniya 02.04.2026)
- [11] Programmnyy kompleks ONEPLAN RPLS-DB planirovaniya i optimizatsii podvizhnoj i fiksirovannoy svyazi (setevaya versiya) Reestrovaya zapis' №8968 ot 28.01.2021 URL: [https://reestr.digital.gov.ru/reestr/310318/?sphrase\\_id=9138421](https://reestr.digital.gov.ru/reestr/310318/?sphrase_id=9138421) (data obrashcheniya 03.04.2026)
- [12] Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 09.06.2003 N 135 (red. ot 19.12.2007) O vvedenii v dejstvie Sanitarnykh pravil i normativov - SanPiN 2.1.8./2.2.4.1383-03 (vmeste s SanPiN 2.1.8./2.2.4.1383-03. 2.1.8. Fizicheskie faktory okruzhayushchej prirodnoj sredy. 2.2.4. Fizicheskie faktory proizvodstvennoj sredy. Gigenicheskie trebovaniya k razmeshcheniyu i ekspluatatsii peredayushchikh radiotekhnicheskikh ob'ektov. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy, utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 09.06.2003) (Zaregistrovano v Minyuste RF 18.06.2003 N 4710) URL:

<https://ekosf.ru/normativnye-dokumenty/em-polya/573-sanpin-2-2-4-1383-03/?ysclid=mnim37nn3z46468953> (data obrashcheniya 03.04.2026)

### **Information about the authors**

Pishchin Oleg Nikolaevich, Cand. of Techn. Sci., Associate Professor, Head of the Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: [o.pishin@yandex.ru](mailto:o.pishin@yandex.ru)

Ivanova Elena Ivanovna, Master's Student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: [elena.ivan03@mail.ru](mailto:elena.ivan03@mail.ru)

# Системная инженерия и инфокоммуникации



Научный сетевой журнал «Системная инженерия и инфокоммуникации» (свид. о регистрации СМИ Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г., ISSN: 3034-686X) — это некоммерческое рецензируемое сетевое издание со свободным доступом. Сайт журнала: <https://sys-engine.ru>

Журнал ориентирован в первую очередь на молодых специалистов в области информационных технологий, робототехники, автоматике, электроники и телекоммуникаций. Аспиранты, магистранты и студенты могут опубликовать в журнале результаты своих исследований, собственный опыт разработки проектов, обзорные статьи.

Журнал выходит четыре раза в год, и принимает к публикации оригинальные статьи, соответствующие тематике журнала. Публикация в журнале бесплатна.

Журнал не преследует коммерческой выгоды, не выплачивает вознаграждения авторам, редакция и рецензенты не получают оплату за свою работу. Публикуя статью в сетевом издании «Системная инженерия и инфокоммуникации», авторы присоединяются к цели журнала — свободному распространению научного знания.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.  
ISSN: 3034-686X

Учредитель: Кутузов Денис Валерьевич  
Сетевое издание размещено по адресу: [sys-engine.ru](https://sys-engine.ru)  
Электронная почта: [d\\_kutuzov@mail.ru](mailto:d_kutuzov@mail.ru)  
Телефон: +7(964)88-22-445