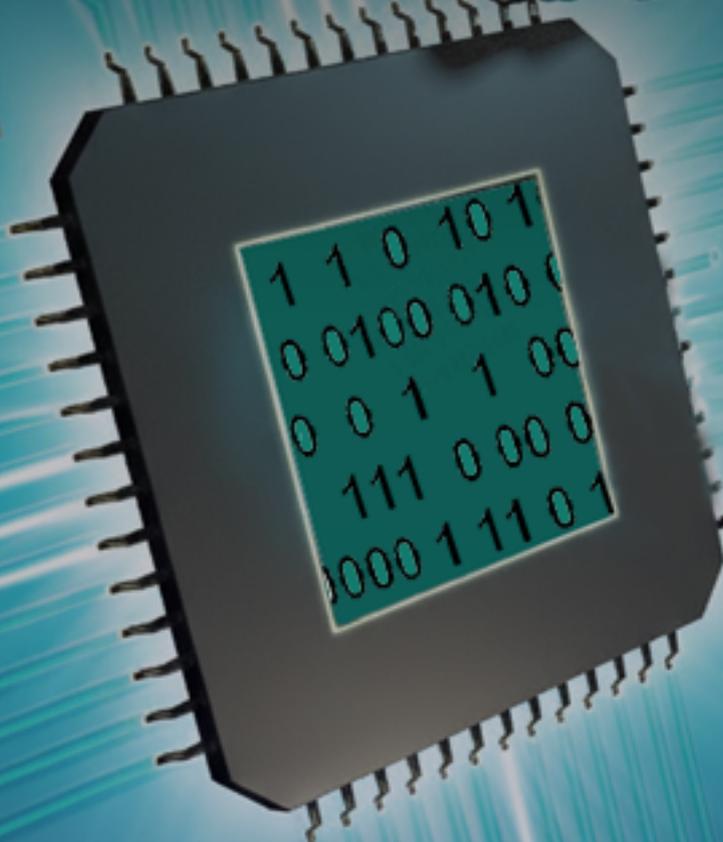


СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ИНФОРКОММУНИКАЦИИ

2026, №1(5)



ISSN 3034-686X
sys-engine.ru

Системная инженерия и инфокоммуникации

№1(5), 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.

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.

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

Возрастная категория: 12+

Содержание

Робототехника	4
1 В.И. Назаркин, С.А.К. Диане Сравнительный анализ современных подходов к предотвращению столкновений мобильных роботов на основе метода ORCA	4
2 Е.А. Аникина Управление манипулятором с избыточной кинематикой в сложной среде на основе метода покоординатного спуска	10
Автоматизация в промышленности	16
3 О.В. Стукач, И.А. Ершов Сбор данных потребления тепловой энергии в жилом фонде города	16
Информационные технологии	26
4 С.Н. Кочергин, А.Р. Мамлеева Система обучения сжатию изображений с управляемыми потерями	26
5 А.А. Плеханов, Р.В. Кусмамбетов, В.В. Лаптев Разработка кроссплатформенной учебной среды для обучения программированию школьников и студентов	32
6 С.Г. Горст, Т.В. Хоменко Анализ успеваемости и освоения компетенций студентами Астраханского государственного технического университета	36
Телекоммуникации	40
7 С.В. Мартынов, А.В. Осовский, Д.В. Кутузов Стандарты сетей связи 5G/5G-Advanced для цифровой трансформации железных дорог и развития интеллектуальных транспортных систем	40
8 А.А. Датцкий, О.Н. Пицин Особенности импортозамещения оборудования на выделенной сети предприятия нефтегазового сектора	52

Сравнительный анализ современных подходов к предотвращению столкновений мобильных роботов на основе метода ORCA

В.И. Назаркин, С.А.К. Диане

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация – В работе представлен сравнительный анализ современных модификаций метода оптимального предотвращения взаимных столкновений (ORCA, Optimal Reciprocal Collision Avoidance), применяемого в качестве локального реактивного компонента многоагентных систем маршрутизации мобильных роботов. Рассмотрены фундаментальные ограничения реактивной парадигмы ORCA, включая краткосрочный характер планирования, отсутствие учёта кинематических ограничений и чувствительность к неопределённости восприятия. Для сопоставления подходов предложен унифицированный набор критериев оценки. Проведён анализ современных эволюционных и гибридных модификаций ORCA, включая подходы, интегрирующие глобальное планирование и методы глубокого обучения, что позволяет расширить область применимости базового метода. Результаты работы показывают, что выбор конкретного подхода представляет собой поиск компромисса между расширением функциональности метода и сохранением его вычислительной эффективности с учетом специфики решаемой прикладной задачи.

Ключевые слова – многоагентная маршрутизация, предотвращение столкновений, локальное планирование, реактивные методы, гибридные архитектуры, мобильные роботы, безопасность движения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задача предотвращения столкновений в динамически изменяющейся среде является одной из ключевых в мобильной робототехнике [1]. Для её решения широко применяются методы, обеспечивающие работу в реальном времени без централизованного управления. Одним из наиболее распространённых подходов является метод оптимального предотвращения взаимных столкновений (ORCA, Optimal Reciprocal Collision Avoidance – оптимальное взаимное предотвращение столкновений), который реализует локальное реактивное предотвращение столкновений для каждой пары агентов, обеспечивая вычислительную эффективность и формальные гарантии безопасности.

При этом базовый метод ORCA не предназначен для планирования маршрутов или глобальной маршрутизации, а его использование в составе систем маршрутизации сопровождается рядом

фундаментальных ограничений в рамках своей реактивной парадигмы: краткосрочный горизонт планирования, идеализированная голономная модель агента, склонность к локальным минимумам и чувствительность к неточным данным о состоянии окружающей среды. В последние годы предложено множество модификаций ORCA, направленных на расширение его роли в архитектуре управления, включая добавление глобального планирования, дополнительных модулей для работы с кинематикой, а также методов машинного обучения. Такие подходы позволяют повысить эффективность и надёжность маршрутизации агентов в более сложных сценариях передвижения на местности [2].

Целью данной работы является формирование классификации современных модификаций метода ORCA на основе унифицированных критериев. Это позволит проанализировать компромисс между расширением функциональности метода и сохранением его вычислительной эффективности для точного и оперативного выбора управляющих решений в соответствии с требованиями прикладной задачи.

II. АНАЛИЗ ТЕКУЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ МЕТОДА ORCA

ORCA представляет собой децентрализованный и работающий в реальном времени метод, который решает задачу в пространстве скоростей, что значит для каждой пары агентов строится геометрическое ограничение, гарантирующее отсутствие столкновений в течение заданного временного горизонта. Каждый агент выбирает новую скорость, максимально близкую к предпочтительной, но удовлетворяющую всем геометрическим ограничениям, формируемым для предотвращения столкновений с соседними агентами. Метод ORCA строится на двух ключевых принципах: взаимности и вычислительной эффективности [3], что отражено в его формуле, задающей полуплоскость разрешенных скоростей v робота в пространстве скоростей $v_x, v_y \in \mathbb{R}^2$:

$$ORCA_{A|B}^r = \{v \mid (v - (v_A^{opt} + \frac{1}{2}u)) \cdot n \geq 0\}, \quad (1)$$

где τ – временной горизонт, $ORCA_{A|B}$ – множество допустимых скоростей, v – вектор возможной новой скорости, v_A^{opt} – оптимальная скорость, u – вектор минимального изменения относительной скорости, n – единичный вектор нормали, $|$ – оператор задания условия, \cdot – оператор скалярного произведения.

Первое открытое описание данного метода было представлено в 2011 году [4]. И благодаря своей вычислительной эффективности и простоте реализации остаётся одним из самых цитируемых и широко используемых методов локального предотвращения столкновений [5]. При этом важно подчеркнуть, что базовый ORCA реализует только локальную реактивную логику, и его использование в составе систем маршрутизации сопровождается рядом фундаментальных ограничений, что может привести к неоптимальным или осциллирующим траекториям, а в некоторых случаях и к полной остановке агента [6]. Также подчеркивается аспект, связанный с тем, что ORCA рассматривает всех агентов как одинаковые частицы и не кодирует социальные нормы или приоритеты [7].

Для систематического анализа и сопоставления подходов, расширяющих базовую парадигму ORCA, предложен унифицированный набор из семи критериев оценки, сгруппированных в три логические категории.

К первой категории относятся архитектурные и вычислительные свойства, а именно горизонт планирования, вычислительная сложность и масштабируемость при росте числа агентов.

В состав второй категории входят физические ограничения, а именно интеграция кинематических и динамических моделей реальных роботов и устойчивость к локальным минимумам.

Третья категория включает гарантии и поведенческие аспекты, а именно формальные гарантии безопасности и моделирование социальных норм и приоритетов.

Каждый критерий оценивается по трёхбалльной порядковой шкале: подход подвержен известному ограничению, подход смягчает ограничение, подход успешно решает проблему. Следует отметить, что шкала носит качественный характер и предназначена для существенного сравнения подходов, а не количественного ранжирования.

III. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПРЕОДОЛЕНИЮ ОГРАНИЧЕНИЙ МЕТОДА ORCA

A. Гибридный подход MPPI-SOCP-ORCA

Данный подход описывает гибридное решение, расширяющее локальную реактивную парадигму ORCA [8]. На каждом шаге планирования агент генерирует множество возможных траекторий на ближайший отрезок времени с использованием модели интеграла предиктивного пути (MPPI, англ. Model Predictive Path Integral – модель интеграла предиктивного пути). Из

полученного множества выбирается оптимальная траектория с точки зрения достижения цели, плавности движения и минимизации вероятности столкновения. Для оценки безопасности подход расширяет классические геометрические ограничения ORCA, придавая им вероятностный характер и контролируя, чтобы риск столкновения с соседними агентами не превышал заданного порога даже при наличии неточных данных о положении и скорости. Ограничения интерпретируются как задачи конуса второго порядка (SOCP, Second-Order Cone Programming – программирование конусов второго порядка), что позволяет встроить их в процесс MPPI.

Таким образом, агент действует децентрализованно, используя многошаговое прогнозирование с учётом неопределённостей для выбора не только безопасной, но и эффективной скорости (Рис. 1).

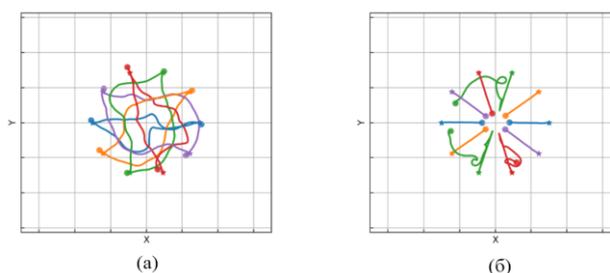


Рис. 1. Траектории агента: (а) траектории, полученные с помощью MPPI-SOCP-ORCA и (б) траектории, полученные базовым методом

С точки зрения горизонта планирования, подход существенно расширяет возможности локального компонента ORCA, оптимизируя траектории на несколько шагов вперёд и обеспечивая вероятностные гарантии безопасности [9]. Однако эти преимущества достигаются за счёт увеличения вычислительной нагрузки из-за решения задач конуса второго порядка, а консервативность вероятностных ограничений может приводить к излишней осторожности, что увеличивает время достижения целей. Эти допущения могут ограничивать масштабируемость системы, хотя оригинальная статья демонстрирует устойчивую работу в сценариях с несколькими десятками агентов.

B. Иерархический подход H-ORCA

Иерархический подход H-ORCA (англ. Hierarchical Optimal Reciprocal Collision Avoidance – иерархическое оптимальное взаимное предотвращение столкновений) строится на последовательном улучшении решений, генерируемых базовым методом [10]. В первую очередь стандартный ORCA вычисляет область безопасных скоростей, после чего модуль сглаживания скорости (VS-ORCA, Velocity-Smoothed ORCA – ORCA со сглаженной скоростью), накладывает дополнительные кинематические ограничения, обеспечивая выбор безопасной и плавно изменяющейся скорости, предотвращая резкие или невыполнимые манёвры.

Далее второй модуль, предназначенный для избежания локальных минимумов, анализирует конфигурацию препятствий и адаптивно корректирует целевую скорость, направляя агента в обход препятствий и предотвращая застревание.

Этот подход демонстрирует эволюционное расширение парадигмы ORCA, эффективно решая задачи учёта кинематики и предотвращения локальных минимумов, что повышает реалистичность и надёжность траекторий для физических платформ. При этом улучшения достигаются за счёт увеличения вычислительной сложности, что может ограничивать масштабируемость при очень большом числе агентов. H-ORCA остаётся в рамках краткосрочного реактивного горизонта планирования, не учитывает явно неопределённости восприятия и не моделирует логику социальных взаимодействий агентов, сохраняя характер локального реактивного метода.

C. ORCA, ориентирующийся по топологии

Альтернативный двухуровневый топологический подход (англ. Topology-Guided ORCA) представляет собой гибридный метод, который сочетает глобальное планирование с локальным реактивным компонентом ORCA для преодоления ограничений базового метода, а именно учёт структуры среды со статическими препятствиями [11]. На первом уровне для всей среды на основе преобразования срединной оси строится топологический граф, отражающий основные «коридоры» свободного пространства вокруг препятствий. Для каждого агента на этом графе ищется кратчайший путь к цели, который превращается в последовательность промежуточных опорных точек. На втором уровне локальный ORCA используется не для движения к конечной цели напрямую, а для маршрутизации между опорными точками, обеспечивая реактивное предотвращение столкновений с другими движущимися агентами (Рис. 2).

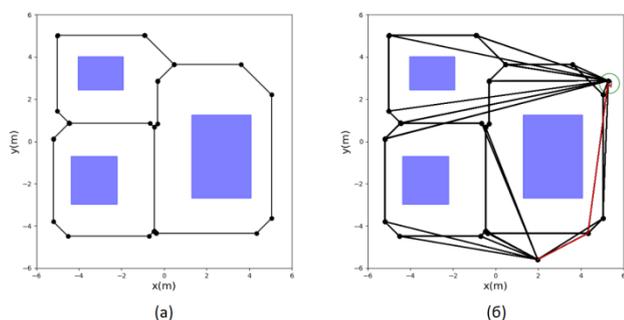


Рис. 2. Результат работы подхода: (а) графическое представление среды, включающей три статических препятствия, и (б) расширенный граф агента

Зеленая окружность обозначает агента, а красные линии показывают его путь к цели. Как видно, сгенерированный путь направляет агента в обход препятствий [11].

Эффективность подхода также подтверждается в статье [12]. Вводя последовательность промежуточных целей, предложенный подход существенно расширяет горизонт планирования локального компонента ORCA, что приводит к более гладким и оптимальным траекториям. Однако необходимость построения и обновления глобального графа среды добавляет вычислительные затраты и требует частичного отхода от децентрализованной парадигмы, ограничивая масштабируемость при большом числе агентов. Как и базовый ORCA, локальный компонент не учитывает сложную кинематику и неопределённость восприятия, оставаясь в рамках голономной модели агента, и не моделирует социальные нормы или приоритеты.

D. Гибридный подход ORCA-FLC

Гибридный подход ORCA-FLC основан на использовании нечёткого логического контроллера (FLC, англ. Fuzzy Logic Controller – контроллер с нечеткой логикой) и направленный на работу с неидеальными, шумными данными [13]. На каждом шаге планирования базовый метод вычисляет область безопасных скоростей. Параллельно два модуля нечёткого контроллера анализируют входные данные: первый оценивает относительные расстояния и скорости для определения степени ответственности каждого агента за манёвр, второй прогнозирует ожидаемое поведение соседей.

Выходные параметры этих модулей динамически подстраивают исходные геометрические ограничения ORCA, изменяя и смягчая область допустимых скоростей в зависимости от текущей ситуации и уверенности в данных. Таким образом, агент выбирает окончательную скорость из адаптированной области, сохраняя децентрализованную природу подхода, но приобретая возможность более гибких и контекстно-обусловленных решений (Рис. 3).

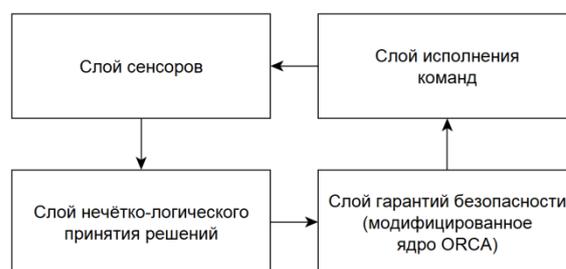


Рис 3. Схема архитектуры подхода ORCA-FLC

ORCA-FLC направлен на решение одного из ограничений, а именно работы с шумными и неполными данными. В сценариях с высокой динамикой или неточными сенсорами он демонстрирует повышенную надёжность по сравнению с оригинальным методом. Однако такая адаптивность достигается ценой увеличения вычислительной сложности, а также частичной потери детерминированности и строгих гарантий безопасности. Поведение системы становится

менее предсказуемым и зависит от эмпирической настройки правил нечёткой логики. Стоит также отметить, что этот подход не расширяет горизонт планирования, не учитывает кинематику и остаётся в рамках локального реактивного компонента с голономной моделью агента.

Е. Гибридный подход SRL-ORCA

Гибридный подход SRL-ORCA объединяет два компонента: модуль глубокого обучения с подкреплением (DRL, англ. Deep Reinforcement Learning – глубокое обучение с подкреплением) и модифицированный локальный метод ORCA [14]. Модуль DRL, обученный с учётом социальных норм, формирует основную политику маршрутизации, генерируя действия, которые являются эффективными и социально приемлемыми. Одновременно локальный компонент ORCA, основанный на геометрической модели скоростных ограничений, обеспечивает гарантированно безопасное множество допустимых скоростей для агента с учётом приоритетов других участников движения.

Финальное действие выбирается по гибкой схеме: если предложение DRL безопасно, оно выполняется без изменений; иначе выбирается ближайшая безопасная альтернатива из множества ORCA. В предельно сложных ситуациях управление полностью передаётся локальному ORCA. Таким образом, агент действует децентрализованно, используя социально-обученную политику DRL для эффективного движения, при этом локальный ORCA сохраняет строгие гарантии безопасности. Работу подхода можно отразить в виде формулы:

$$a_i^{final} = \Pi_{ORCA_i^{\tau-prior}}(a_i^{RL}), \quad (2)$$

где a_i^{RL} – действие, предложенное нейронной сетью глубокого обучения с подкреплением, $ORCA_i^{\tau-prior}$ – безопасное множество скоростей, рассчитанное модифицированным методом ORCA, $\Pi()$ – оператор проекции, a_i^{final} – гарантированно безопасное действие.

Подход демонстрирует умеренную вычислительную сложность и хорошую масштабируемость благодаря децентрализованной архитектуре, основанной на локальных взаимодействиях. Он эффективно снижает риск локальных минимумов за счёт социально-обученной политики DRL, но сохраняет абсолютные гарантии безопасности, предоставляемые геометрическим ядром ORCA, которое выступает в качестве защитного слоя. Однако подход не учитывает явных кинематических ограничений агента.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рассмотренные выше подходы демонстрируют различные стратегии преодоления ограничений

локального реактивного метода ORCA. Для наглядного сопоставления степени решения одних и тех же проблем в разных подходах был проведён сравнительный анализ, результаты которого сведены в Табл. I. Данная таблица обобщает подходы по ряду унифицированных критериев, описанных ранее.

ТАБЛИЦА I
РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА МОДИФИКАЦИЙ МЕТОДА ORCA

Критерий \ Параметр	MPPI-ORCA	H-ORCA	Topology-Guided ORCA	SRL-ORCA	ORCA-FLC
Горизонт	2	1	2	3	1
Сложность	3	2	2	3	2
Масштабируемость	2	2	2	3	3
Кинематика	3	2	1	1	1
Локальные минимумы	1	2	3	2	1
Гарантии безопасности	3	2	2	2	2

Данные, представленные в Табл. I, позволяют выявить как степень устранения отдельных ограничений базового метода ORCA, так и характер возникающих компромиссов. Высокие оценки по отдельным критериям часто достигаются за счёт снижения показателей по другим, что отражает фундаментальные противоречия между локальной реактивностью, вычислительной эффективностью и выразительной мощностью моделей.

В области архитектуры и горизонта планирования наблюдается чёткое разделение подходов. Классические подходы, такие как H-ORCA и ORCA-FLC, сохраняют локальный реактивный характер ORCA и демонстрируют минимальное расширение горизонта планирования. Гибридные подходы, интегрирующие глобальное планирование или социально-обученные политики (Topology-Guided ORCA и SRL-ORCA), значительно увеличивают временной контекст принимаемых решений.

Расширение горизонта планирования и усложнение моделей поведения обычно сопровождаются ростом вычислительной сложности. Анализ критериев учёта кинематики и локальных минимумов показывает, что эти ограничения редко устраняются одновременно. Так, например, MPPI-SOCP-ORCA делает упор на учёт динамических ограничений, ценой вычислительной нагрузки. В то же время H-ORCA обеспечивает достаточно сбалансированное решение за счёт модулей сглаживания скорости и выхода из тупиков. Подходы, ориентированные на социальное поведение или устойчивость к шумам (SRL-ORCA и ORCA-FLC), меньше фокусируются на физической реализуемости движения.

Особое внимание следует уделить критерию формальных гарантий безопасности. Подходы, сохраняющие геометрическое ядро ORCA, в той или

иной степени наследуют детерминированные или вероятностные гарантии отсутствия столкновений. В противоположность этому, гибридные подходы с глубоким обучением или нечёткой логикой ослабляют формальные гарантии, заменяя их эмпирической надёжностью, зависящей от качества обучения или настройки правил.

Таким образом, сравнительный анализ демонстрирует, что каждый гибридный подход представляет собой поиск компромисса между расширением функциональности ORCA, обеспечением безопасности, учётом физической реализуемости и вычислительной эффективностью метода.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был выполнен сравнительный анализ современных модификаций метода ORCA, направленных на преодоление его фундаментальных ограничений, включая краткосрочный горизонт планирования, отсутствие учёта кинематики, склонность к локальным минимумам и работу в условиях неопределённости.

Проведённая оценка по унифицированному набору критериев показала, что интеграция ORCA в архитектуру гибридных подходов позволяет компенсировать ключевые ограничения базового метода, однако требует компромиссов между вычислительной сложностью, масштабируемостью и сохранением формальных гарантий безопасности. Эволюционные подходы (H-ORCA, ORCA-FLC) сохраняют реактивный характер и хорошую масштабируемость, но лишь частично устраняют выявленные ограничения, тогда как гибридные подходы (MPPI-ORCA, Topology-Guided ORCA, SRL-ORCA) обеспечивают более глубокий контекст принятия решений ценой роста вычислительной нагрузки и архитектурной сложности.

Анализ также позволил оценить переносимость рассмотренных гибридных систем на более сложные классы задач. Несмотря на теоретическую возможность обобщения геометрической модели ORCA на многомерные пространства, практические реализации сохраняют исходные упрощения: голономную модель агента и реактивный характер принятия решений. Это ограничивает прямую применимость к системам с выраженными динамическими и кинематическими ограничениями, например, к беспилотным летательным аппаратам. Таким образом, ORCA и его расширения целесообразно рассматривать преимущественно в роли локального контроллера или защитного модуля, интегрируемого в более сложные, иерархические или гибридные архитектуры.

Таким образом, результаты анализа подтверждают компромиссный характер современных гибридных систем маршрутизации мобильных роботов: ни один из рассмотренных подходов не способен одновременно

обеспечить долгосрочное планирование, строгие гарантии безопасности, учёт физических ограничений и социальную адекватность. Следовательно, выбор конкретной архитектуры должен определяться приоритетами прикладной задачи: гарантиями безопасности, технологической и социальной адекватностью, устойчивостью к шуму или эффективностью в сложной среде. Проведённая систематизация подходов по унифицированному набору критериев создаёт методологическую основу для осознанного проектирования гибридных систем маршрутизации мобильных роботов, в которых реактивный модуль ORCA эффективно дополняется планирующими или обучаемыми компонентами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. Yang, L. An, C. Zhao, "Collision/Obstacle Avoidance Coordination of Multi-Robot Systems: A Survey," *Actuators* (MDPI), vol. 14 (2), pp. 85, 2025.
- [2] K. Arshid et al, "Toward Autonomous UAV Swarm Navigation: A Review of Trajectory Design Paradigms," *Sensors* (Basel, Switzerland), vol. 25(18), pp. 5877, 2025.
- [3] H. Niu, C. Ma, P. Han, "Directional optimal reciprocal collision avoidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 136, pp. 103705, 2021.
- [4] J. Van Den Berg, S. J. Guy, M. Lin, and D. Manoch, "Reciprocal n-body collision avoidance," *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*. Berlin, Heidelberg (Springer Berlin Heidelberg), pp. 3-19, 2011.
- [5] M. Golchoubian, M. Ghafurian, K. Dautenhahn and N. L. Azad, "Uncertainty-aware DRL for autonomous vehicle crowd navigation in shared space," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 9(12), pp. 7931-7944, 2024.
- [6] D. J. Gnon, D. Paez-Granados, A. Billard, "Reactive navigation in crowds for non-holonomic robots with convex bounding shape," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6 (3), pp. 4728-4735, 2021.
- [7] Y. Gao, C. M. Huang, "Evaluation of socially-aware robot navigation," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 8, pp. 721317, 2022.
- [8] S. Dergachev, K. Yakovlev, "Decentralized Uncertainty-Aware Multi-Agent Collision Avoidance with Model Predictive Path Integral," *2025 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 12456-12463, 2025.
- [9] S. Dergachev, K. Yakovlev, "Model predictive path integral for decentralized multi-agent collision avoidance," *PeerJ Computer Science*, vol. 10, pp. e2220, 2024.
- [10] W. Wang, H. Qian, "A hierarchical ORCA framework for multi-UAV navigation in unstructured environments with velocity optimization and local minima avoidance," *Expert Systems with Applications*, vol. 296, pp. 129205, 2025.
- [11] F. C. Pouria, Z. Huang, A. Yammanuru, S. Liu, K. Driggs-Campbell, "Topology-Guided ORCA: Smooth Multi-Agent Motion Planning in Constrained Environments," *arXiv:2407.16771*, 2024.
- [12] M. Sun, F. Baldini, P. Trautman, T. Murphey, "Move beyond trajectories: Distribution space coupling for crowd navigation," *arXiv:2106.13667*, 2021.
- [13] J. London, "Improved Obstacle Avoidance for Autonomous Robots with ORCA-FLC," *arXiv:2508.06722*, 2025.
- [14] J. Qin, J. Qin, J. Qiu, Q. Liu, M. Li, Q. Ma, "SRL-ORCA: A socially aware multi-agent mapless navigation algorithm in complex dynamic scenes," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9 (1), pp. 143-150, 2023.

Информация об авторах

Назаркин Владимир Иванович, аспирант РТУ МИРЭА, Москва, Россия, nazarkin.v.i@edu.mirea.ru.

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, доцент кафедры проблем управления РТУ МИРЭА, старший научный сотрудник ИПУ РАН, Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422.

Comparative analysis of methods for overcoming the limitations of the ORCA algorithm

V. I. Nazarkin, S. A. K. Diane

MIREA–Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract – This paper presents a comparative analysis of contemporary modifications of the Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA) method, used as a local reactive component in multi-agent control systems for mobile robots. The fundamental limitations of the reactive ORCA paradigm are discussed, including its short-term planning horizon, neglect of kinematic constraints, and sensitivity to perception uncertainty. A unified set of evaluation criteria is proposed for comparing different approaches. Modern evolutionary and hybrid modifications of ORCA are analyzed, including methods integrating global planning and deep learning, which extend the applicability of the base model. The results of the work show that the choice of a specific approach is a compromise between expanding the functionality of the method and maintaining its computational efficiency, taking into account the specifics of the applied problem.

Keywords – multi-agent routing, collision avoidance, local planning, reactive methods, hybrid architectures, mobile robots, motion safety.

References

- [1] G. Yang, L. An, C. Zhao, "Collision/Obstacle Avoidance Coordination of Multi-Robot Systems: A Survey," *Actuators (MDPI)*, vol. 14 (2), pp. 85, 2025.
- [2] K. Arshid et al, "Toward Autonomous UAV Swarm Navigation: A Review of Trajectory Design Paradigms," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 25(18), pp. 5877, 2025.
- [3] H. Niu, C. Ma, P. Han, "Directional optimal reciprocal collision avoidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 136, pp. 103705, 2021.
- [4] J. Van Den Berg, S. J. Guy, M. Lin, and D. Manoch, "Reciprocal n-body collision avoidance," *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*. Berlin, Heidelberg (Springer Berlin Heidelberg), pp. 3-19, 2011.
- [5] M. Golchoubian, M. Ghafurian, K. Dautenhahn and N. L. Azad, "Uncertainty-aware DRL for autonomous vehicle crowd navigation in shared space," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 9(12), pp. 7931-7944, 2024.
- [6] D. J. Gonon, D. Paez-Granados, A. Billard, "Reactive navigation in crowds for non-holonomic robots with convex bounding shape," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6 (3), pp. 4728-4735, 2021.
- [7] Y. Gao, C. M. Huang, "Evaluation of socially-aware robot navigation," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 8, pp. 721317, 2022.
- [8] S. Dergachev, K. Yakovlev, "Decentralized Uncertainty-Aware Multi-Agent Collision Avoidance with Model Predictive Path Integral," 2025 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 12456-12463, 2025.
- [9] S. Dergachev, K. Yakovlev, "Model predictive path integral for decentralized multi-agent collision avoidance," *PeerJ Computer Science*, vol. 10, pp. e2220, 2024.
- [10] W. Wang, H. Qian, "A hierarchical ORCA framework for multi-UAV navigation in unstructured environments with velocity optimization and local minima avoidance," *Expert Systems with Applications*, vol. 296, pp. 129205, 2025.
- [11] F. C. Pouria, Z. Huang, A. Yammanuru, S. Liu, K. Driggs-Campbell, "Topology-Guided ORCA: Smooth Multi-Agent Motion Planning in Constrained Environments," arXiv:2407.16771, 2024.
- [12] M. Sun, F. Baldini, P. Trautman, T. Murphey, "Move beyond trajectories: Distribution space coupling for crowd navigation," arXiv:2106.13667, 2021.
- [13] J. London, "Improved Obstacle Avoidance for Autonomous Robots with ORCA-FLC," arXiv:2508.06722, 2025.
- [14] J. Qin, J. Qin, J. Qiu, Q. Liu, M. Li, Q. Ma, "SRL-ORCA: A socially aware multi-agent mapless navigation algorithm in complex dynamic scenes," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9 (1), pp. 143-150, 2023.

Information about authors

Vladimir Ivanovich Nazarkin, postgraduate student at RTU MIREA, Moscow, Russia, nazarkin.v.i@edu.mirea.ru.

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

Управление манипулятором с избыточной кинематикой в сложной среде на основе метода покоординатного спуска

Е.А. Аникина

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация – В статье рассмотрен вопрос управления манипулятором с избыточной кинематикой. Описана кинематическая схема многозвенного робота-манипулятора KUKA iiwa LBR 7 R800. Предложен комплексный алгоритм управления манипуляционным роботом на базе сочетания метода покоординатного спуска с информацией о матрице Якоби манипулятора вблизи препятствий, расположенных в рабочей зоне робота. Приведены результаты экспериментальных исследований с оценкой работоспособности предложенного алгоритма и выводы о возможностях развития данного подхода.

Ключевые слова – автоматизированный склад, виртуальная модель, метод Денавита-Хартенберга, манипуляционный робот, метод покоординатного спуска, избыточная кинематика

1. ВВЕДЕНИЕ

Манипуляционные роботы занимают ключевое место в автоматизации современных складских помещений, оптимизируя рабочий процесс. Для демонстрации функционала таких роботов и отладки их движений используются виртуальные среды моделирования. Причем наряду с визуализацией алгоритмов движения такие среды позволяют проектировать рабочую область манипулятора и проводить комплексную оценку эффективности. Поэтому целью исследования стала разработка виртуальной модели складского робота-манипулятора и совместимого с ним информационно-управляющего алгоритма для перемещения тестового объекта со стеллажа в контейнер.

С середины прошлого века и по настоящее время наблюдается рост потребности в гибких, безопасных и точных роботах для использования в средах со сложной геометрией, таких как производственные линии и склады [1]. Избыточная кинематика манипуляторов, с семью и более степенями свободы, позволяет решать задачи управления в условиях ограничений: обход препятствий в рабочей зоне, избежание самопересечения звеньев робота, оптимизация пути по метрикам времени и ориентации

захватного устройства. На Рис. 1 представлен пример семизвеного манипулятора.

В последние годы активно развиваются методы управления избыточными манипуляторами. В работе [2] предложен итеративный метод решения обратной задачи кинематики (ОЗК) с использованием алгебры кватернионов, обеспечивающий высокую точность ориентации конечного звена, однако, требующий значительных вычислительных ресурсов и не учитывающий динамические препятствия.

В исследовании [3] рассмотрен алгоритм перемещения манипулятора в среде с неизвестными препятствиями на основе метода потенциальных полей; при этом подход не гарантирует сходимости в условиях узких проходов и локальных минимумов. В работах [4] используется вероятностный метод построения маршрута (PRM), адаптированный для мультиагентных систем, но он не оптимизирован для реального времени и требует предварительного этапа эмплирования конфигурационного пространства.

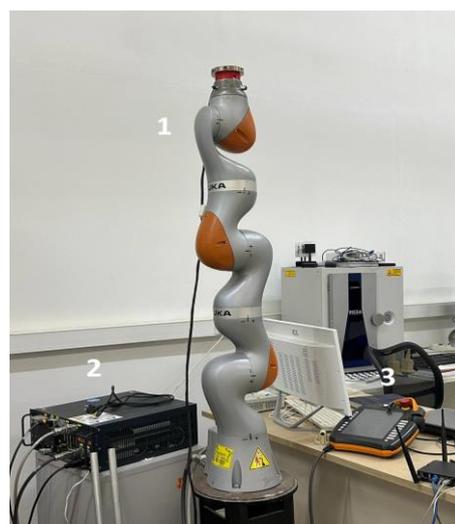


Рис. 1. Манипуляционный робот с избыточной кинематикой: 1 – модель робота KUKA LBR iiwa 7 R800; 2 – блок питания и управления роботом KUKA Sunrise Cabinet; 3 – пульт оператора в составе блока управления

В проведенном исследовании предложен гибридный подход, сочетающий метод покоординатного спуска с использованием информации из матрицы Якоби для задач уклонения от препятствий, что обеспечивает как устойчивость, так и адаптивность в малогабаритных пространствах. Была реализована полная виртуальная модель складской ячейки в среде CoppeliaSim с учётом физического размещения объектов и габаритов робота KUKA LBR iiwa 7 R800. Полученный алгоритм ориентирован на низкие вычислительные затраты, что делает его применимым как в учебных, так и в промышленных сценариях автоматизированных складов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется применить метод Денавита-Хартенберга описания кинематики манипуляционных роботов, методы расчета и визуализации рабочих зон манипуляционных роботов для манипулятора с избыточной кинематикой, на примере робота KUKA LBR iiwa 7 R800. Разработать комплексный алгоритм, сочетающий в себе методы решения обратной задачи кинематики и методы уклонения от препятствий в рабочей зоне манипулятора с использованием матрицы Якоби. Проанализировать возможности применения современных средств виртуального моделирования и визуализации для экспериментальной проверки эффективности алгоритма управления манипуляционным роботом.

Основными задачами данной работы является реализация виртуальной модели манипуляционного робота в среде CoppeliaSim на языке программирования Python.

Для выполнения работы нужно составить кинематическую схему манипуляционного робота, разработать виртуальную модель складской ячейки, разработать виртуальную модель манипуляционного робота, реализовать тестовое перемещение робота.

Требуется решить задачу для робота KUKA LBR iiwa 7 R800 со следующими параметрами:

Длины звеньев (смещения вдоль оси z_{i-1}):
 $d_1 = 0,340$ м, $d_2 = 0$ м, $d_3 = 0,400$ м, $d_4 = 0$ м,
 $d_5 = 0,400$ м, $d_6 = 0$ м, $d_7 = 0,126$ м.

Углы поворота (угол между осями z_{i-1} и z_i):
 $\alpha_1 = -\pi/2$, $\alpha_2 = +\pi/2$, $\alpha_3 = +\pi/2$, $\alpha_4 = -\pi/2$, $\alpha_5 = -\pi/2$,
 $\alpha_6 = +\pi/2$, $\alpha_7 = 0$.

Координаты основания: $P = [0, 0, 0]$.

Координаты основания: $P = [x_d, y_d, z_d] \in R^3$.

Управляющее воздействие формируется на основе покоординатного спуска и коррекции через матрицу Якоби для уклонения от препятствий. Вектор управляющих воздействий на робота в момент времени t определяется по формуле:

$$\Delta q(t) = \begin{cases} \Delta q_{cd}(t), & \text{при отсутствии препятствия,} \\ k_{cd} \Delta q_{cd}(t) + k_{avoid} \Delta q_{avoid}(t), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где q_{cd} – шаг коррекции углов суставов, необходимый для минимизации ошибки между текущим и желаемым положением схвата в отсутствие препятствий; q_{avoid} – поправка к углам суставов для уклонения от препятствий; k_{cd} , k_{avoid} – весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого сигнала. Однако Δq_{avoid} вычисляется через псевдообратную матрицу Якоби и вектор отталкивания, что подразумевает возможность масштабирования данной величины.

Критерий остановки движения робота заключается в одновременном выполнении условий по позиции и ориентации:

1. $\| p(q) - p(d) \| \leq \varepsilon_{pos}$ – вектор ошибки позиционирования схвата не больше допустимой позиционной ошибки.
2. $\angle (R(q), R_d) \leq \varepsilon_{pos}$ – угол между ориентациями R_1 и R_2 не больше допустимой угловой ошибки.

III. КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Метод Денавита-Хартенберга (ДН-метод) является процедурой параметризации кинематических цепей робота. Он используется для описания положения и ориентации каждого звена манипулятора по отношению к предыдущему [1].

Рассмотрим применение метода для семизвеного робота-манипулятора (Рис. 2), согласно классической схеме, используемой в целом ряде исследований [5-8]. Согласно ДН-методу, каждое звено описывается четырьмя ДН-параметрами (Табл. I):

θ_i – угол вращения вокруг оси z_{i-1} ;

d_i – смещение вдоль оси z_{i-1} ;

a_i – длина звена (смещение вдоль оси x_i);

α_i – угол между осями z_{i-1} и z_i , измеренный вокруг x_i .

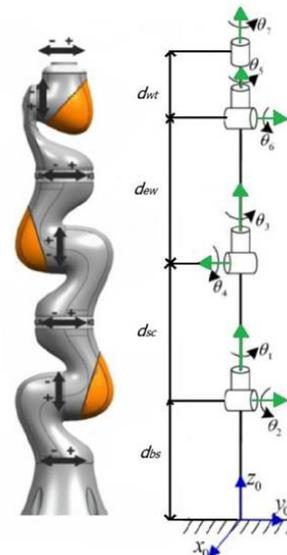


Рис. 2. Кинематическая схема семизвеного робота-манипулятора

Смещение вдоль оси z_{i-1} в Табл. I выражено через d_i , где: d_{bs} – расстояние от основания до плеча, d_{sc} – расстояние от плеча до локтя, d_{ew} – расстояние от локтя до запястья, d_{wt} – расстояние от запястья до конечного звена.

Значения начальных углов скручивания и смещений, приведённые в Табл. I, соответствуют кинематической схеме, представленной на Рис. 2, которая демонстрирует геометрию семизвённого манипулятора KUKA LBR iiwa 7 R800.

ТАБЛИЦА I
ДН-ПАРАМЕТРЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

Номер звена	Смещение вдоль оси z_{i-1}	Значение смещения, м	Угол между осями (z_{i-1}, z_i)	Начальное значение угла
1	d_{bs}	0.340	θ_1	$-\pi/2$
2	0	0	θ_2	$+\pi/2$
3	d_{sc}	0.400	θ_3	$-\pi/2$
4	0	0	θ_4	$+\pi/2$
5	d_{ew}	0.400	θ_5	$-\pi/2$
6	0	0	θ_6	$+\pi/2$
7	d_{wt}	0.126	θ_7	0

На основе ДН-параметров строятся однородные матрицы преобразования ${}^{i-1}T_i \in R^{4 \times 4}$, а общая матрица перехода от базовой системы координат к системе, связанной с конечным звеном, вычисляется как:

$$T = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot \dots \cdot {}^6T_7. \quad (2)$$

Метод решения ОЗК в данном исследовании основан на аналитическом подходе с использованием геометрической модели, основанной на структуре плечо-локоть-запястье, и параметров Денавита-Хартенберга. Обратная задача разбивается на определение положения запястья и ориентации инструмента отдельно. Используется виртуальный робот с теми же параметрами, но третий сустав фиксирован в 0, чтобы упростить построение "эталонной плоскости". Строится плоскость "плечо-локоть-запястье", и определяется вектор нормали к этой плоскости. Это позволяет оценить разницу в конфигурации между реальной и виртуальной моделью для определения положения локтя и плеча.

Положение запястья p_w вычисляется как:

$$p_w = p_d - R_d l_{wt}, \quad (3)$$

где $l_{wt} = [0, 0, 0, 126]^T$ – вектор от запястья до конечного звена.

Для вычисления угла в локтевом суставе используется закон косинусов, исходя из длин звеньев

и расстояния от плеча до запястья. ДН-параметры используются для построения матриц преобразования между звеньями робота. Вращения плеча и запястья получаются с помощью линейной комбинации матриц, полученных из нормализованного вектора плечо-запястье. Учет конфигурации (плечо, локоть, запястье) осуществляется с помощью знаковых коэффициентов, позволяя получать несколько возможных решений.

В целях повышения безопасности технологического процесса используется реактивное уклонение от препятствий. Матрица Якоби $J(\theta) \in R^{6 \times 7}$ связывает скорости обобщённых координат θ^* с линейной и угловой скоростями конечного звена x :

$$x^* = J(\theta) \cdot \theta^*. \quad (4)$$

Поскольку рассматриваемый робот имеет семь степеней свободы ($n = 7$), а задача управления требует только шести параметров ($m = 6$) для полного определения положения и ориентации схвата, система является избыточной ($n > m$). Следовательно, существует множество комбинаций углов суставов, которые приводят к одному и тому же положению и ориентации конечного звена. Движение по этим "дополнительным" направлениям, которое не влияет на положение схвата, называется избыточным движением.

Для того чтобы преобразовать произвольный вектор скоростей суставов v в вектор, который лежит строго в нуль-пространстве Якобиана, используется проектор на нуль-пространство. Проектором является матрица $(I - J^+ \cdot J)$, умножение любого вектора скоростей суставов на нее дает вектор, который принадлежит нуль-пространству.

Вблизи препятствий вычисляется направление избыточного движения в нуль-пространстве Якобиана, хранящем изменения в углах суставов, которые не двигают схват:

$$\theta^*_{null} = (I - J^+ \cdot J) \cdot v, \quad (5)$$

где $J \in R^{6 \times 7}$ – матрица Якоби, зависящая от конфигурации манипуляционного робота, J^+ – псевдообратная матрица Якоби, v – вектор, направленный от ближайшего препятствия к конечной точке манипулятора.

Следует отметить, что, несмотря на отсутствие стандартной обратной матрицы для прямоугольной матрицы $J \in R^{6 \times 7}$, псевдообратная матрица Якоби позволяет найти наилучшее приближённое решение уравнения:

$$x^* = J \cdot q^*, \quad (6)$$

где $x^* \in R^6$ – вектор скоростей (3 линейные + 3 угловые), $q^* \in R^7$ – вектор скоростей суставов.

Полученный вклад (5) добавляется к основному решению по обобщённым скоростям движения робота, обеспечивая безопасный обход препятствий без существенного нарушения основной траектории.

При решении задачи уклонения от препятствий используется псевдообратная матрица Якоби, вычисляемая по формуле:

$$J^+ = J^T \cdot (J \cdot J^T)^{-1}. \quad (7)$$

Поскольку для 7-звенного манипулятора выполняется условие $m < n$, $m = 6$ и $n = 7$.

После вычисления J^+ , поправка к углам сочленений определяются по формуле:

$$\Delta q = J^+ \cdot v, \quad (8)$$

где: $v = (x_d - x)$, v – вектор, направленный от ближайшего препятствия, x_d – целевая позиция и ориентация, x – текущая позиция и ориентация.

Таким образом, подобранный метод основан на аналитической геометрии и линейной алгебре с поддержкой ДН-параметров, взятых из технической документации робота KUKA LBR iiwa 7 R800 (таблица 1), и декомпозиции движения на подзадачи. Это даёт устойчивое и точное решение обратной задачи кинематики для 7-звенного манипулятора KUKA LBR iiwa 7 R800.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки эффективности разработанной виртуальной модели и алгоритмов управления манипулятором с избыточной кинематикой в сложной среде на основе метода покоординатного спуска было разработано тестовое программное обеспечение на языке Python в среде CoppeliaSim.

В рамках проведения эксперимента была создана сцена складского помещения в среде моделирования CoppeliaSim EDU и реализовано тестовое перемещение виртуальной модели робота KUKA LBR iiwa 7 R800. Этапы движения представлены на Рис. 3 (а – г).

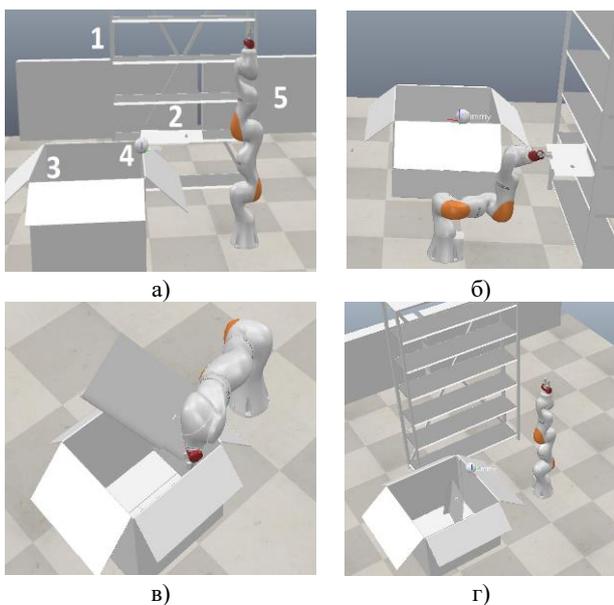


Рис. 3. Этапы движения робота: а) исходное положение, б) захват объекта, в) опускание объекта в целевую точку, г) возвращение в исходную точку

Со стеллажа (позиция 1) захватывался и перемещался малогабаритный груз (позиция 2). Причем пространство для передвижения манипулятора было ограничено стенками коробки (позиция 3), и, дополнительно, точечным виртуальным препятствием (позиция 4) на краю коробки. Как видно из рисунка, манипуляционный робот (позиция 5) успешно справился с поставленной задачей.

На Рис. 4 визуализирована траектория перемещения робота по точкам, где 1 – исходная позиция, 2 – позиция над объектом, 3 – точка захвата, 4 – подъём после захвата, 5 – над целевой позицией, 6 – целевая позиция, 7 – отвод после размещения, 8 –возврат к исходной.

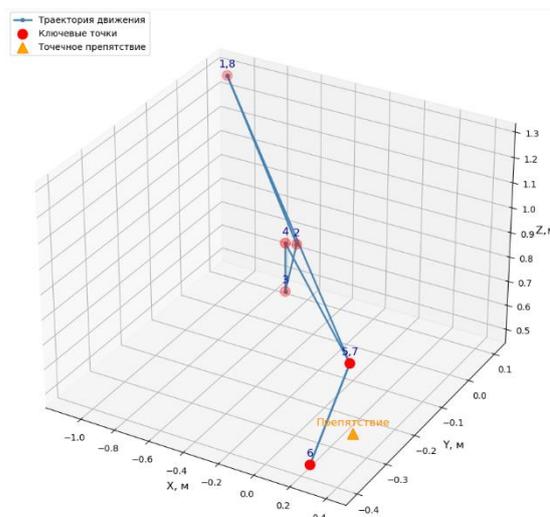


Рис. 4. Траектория движения робота по точкам

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При тестовых запусках были выявлены и решены различные проблемы управления. Одной из них является решение обратной задачи кинематики, поскольку в условиях небольшого складского помещения робот должен выполнять перемещение без опасности для соседствующих объектов и людей. Также было необходимо учесть координаты расположения объектов и робота на сцене.

Матрица Якоби обеспечивает безопасное уклонение от препятствия. Она связывает скорости суставов с линейной и угловой скоростями конечного звена, согласно (4). Когда расстояние от схвата до точечного препятствия становится меньше заданного порога, вычисляется вектор отталкивания, направленный от препятствия к схвату. Этот вектор проецируется в пространство суставных скоростей. Это обеспечивает реактивное уклонение от препятствия, что важно в условиях ограниченного складского пространства.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Манипулятор с избыточной кинематикой отлично подходит для работы с малогабаритными грузами в условиях небольшого складского помещения. Он более безопасен в эксплуатации, так как есть возможность уклонения от препятствий через промежуточные точки.

Метод покоординатного спуска доказал свою эффективность как практичный инструмент для решения обратной задачи кинематики на верхнем уровне системы управления манипуляционным роботом. Матрица Якоби позволила использовать избыточность манипулятора для реактивного уклонения от препятствий на исполнительном уровне системы управления. Размерность матрицы Якоби для 7-звенного робота составляет 6×7 , её нуль-пространство нетривиально и предоставляет дополнительные степени свободы, не влияющие на положение конечного звена.

Для дальнейших исследований можно рассмотреть вариант повышения точности через расширение метода на оптимизацию ориентации конечного звена, внедрение адаптивного размера шага поиска целевых обобщенных координат в зависимости от ошибки. Значительный интерес представляет вопрос оснащения манипуляционного робота захватным устройством и учета геометрии звеньев и захвата робота при планировании траектории его движения [9].

Весьма вероятно, что полученный в рамках данного исследования теоретический задел позволит перенести алгоритм из симуляции на физическую модель робота KUKA LBR iiwa 7 R800 с использованием ROS.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках технологической практики, предусмотренной учебным планом, а также в рамках инициативной НИР № 198-ИИИ «Модели и алгоритмы управления манипуляционными роботами в условиях неопределенности внешней среды» под руководством доцента кафедры проблем управления РТУ МИРЭА Диане С.А.К.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, С. 621, 1989
- [2] Р. Н. Яковлев, “Метод итеративного решения ОЗК с использованием алгебры кватернионов,” *Известия ТулГУ. Технические науки*, № 10, С. 419–429, 2019
- [3] Лопатин П. К. Алгоритм перемещения манипуляционного робота в среде с неизвестными препятствиями // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, № 3 (116), С. 30–35, 2011
- [4] Zhi Y., Jouandeau N., Arab A. C. ACS-PRM: Adaptive Cross Sampling Based Probabilistic Roadmap for Multi-robot Motion Planning // *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 17, no. 1, P. 1–15, 2020
- [5] Neuebot. *KUKA IIWA Inverse Kinematics (kuka_iiwa_ik)* [Электронный ресурс] // GitHub. – URL: https://github.com/neuebot/kuka_iiwa_ik (дата обращения: 05.09.2025)

- [6] KUKA AG. *LBR iiwa 7 R800* [Электронный ресурс] // Официальный сайт KUKA Deutschland. – URL: <https://www.kuka.com/ru-ru/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa> (дата обращения: 05.09.2025)
- [7] Motion-Planning-for-KUKA-LBR [Электронный ресурс] // GitHub. – URL: <https://github.com/USERNAME/Motion-Planning-for-KUKA-LBR> (дата обращения: 05.04.2025)
- [8] I. Zaplana, L. Basañez, “Analytical Inverse Kinematics for 7-DOF Redundant Manipulators with Joint Limits and Obstacle Avoidance,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 106, P. 93–104, 2018
- [9] С.А.К. Диане, Е.А. Аникина, “Управление складским манипуляционным роботом с применением технологии ассоциативной памяти,” *Системная инженерия и инфокоммуникации*, №1, С. 5-10, 2025

Информация об авторах

Аникина Екатерина Александровна, бакалавр РТУ МИРЭА, katerina.anikina.04@mail.ru

Control of a manipulator with redundant kinematics in a complex environment based on coordinate descent method

E.A. Anikina

MIREA–Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract – The article examines the control of a manipulator with redundant kinematics. The kinematic diagram of the KUKA iiwa LBR 7 R800 multi-link robotic manipulator is described. A complex algorithm for control of the manipulation robot is proposed, combining the coordinate descent method with information about the manipulator's Jacobian matrix near environmental obstacles. The results of experimental studies are presented, assessing the performance of the proposed algorithm, and conclusions are drawn regarding the potential for further development of this approach.

Keywords – automated warehouse, virtual model, Denavit-Hartenberg method, robotic manipulator, coordinate descent method, kinematics.

References

- [1] Fu K., Gonzalez R., Lee C. *Robotics*. Moscow: Mir, 621 p, 1989
- [2] Yakovlev R. N. Method of iterative solution of inverse kinematics problem using quaternion algebra. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*, No. 10, P. 419–429, 2019
- [3] Lopatin P. K. Algorithm for moving a manipulator robot in an environment with unknown obstacles. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, No. 3 (116), P. 30–35, 2011
- [4] Zhi Y., Jouandeau N., Arab A. C. ACS-PRM: Adaptive Cross Sampling Based Probabilistic Roadmap for Multi-robot Motion Planning. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 17, no. 1, P. 1–15, 2020
- [5] Neuebot. *KUKA IIWA Inverse Kinematics (kuka_iiwa_ik)* [Electronic resource]. GitHub. URL: https://github.com/neuebot/kuka_iiwa_ik (accessed: 05.09.2025)
- [6] KUKA AG. *LBR iiwa 7 R800* [Electronic resource]. Official website of KUKA Deutschland. URL: <https://www.kuka.com/ru-ru>

[ru/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa](https://github.com/USERNAME/Motion-Planning-for-KUKA-LBR) (accessed: 05.09.2025)

- [7] Motion-Planning-for-KUKA-LBR [Electronic resource]. GitHub. URL: <https://github.com/USERNAME/Motion-Planning-for-KUKA-LBR> (accessed: 05.04.2025)
- [8] Zaplana I., Basañez L. Analytical Inverse Kinematics for 7-DOF Redundant Manipulators with Joint Limits and Obstacle Avoidance. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 106, P. 93–104, 2018
- [9] S.A.K. Diane, E.A. Anikina, “Control of a warehouse manipulation robot using associative memory technology,” *System Engineering and Infocommunications*, No. 1, pp. 5-10, 2025.

Information about the authors

Anikina Ekaterina Alexandrovna, Bachelor of Science at RTU MIREA, katerina.anikina.04@mail.ru

Сбор данных потребления тепловой энергии в жилом фонде города

О.В. Стукач^{1,2}, И.А. Ершов¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Аннотация – Мониторинг состояния теплоснабжения в зависимости от эксплуатационных характеристик зданий необходим для выработки и принятия обоснованных управленческих решений по ремонту и повышению энергоэффективности жилого фонда и поэтому является предметом исследований, основанных на данных. В статье рассмотрены проблемы сбора данных коммерческого учёта тепловой энергии в многоквартирных жилых зданиях в масштабах города. Представлен обзор и классификация методов сбора данных для мониторинга теплопотребления, комфортных условий проживания и эксплуатации зданий. Дан обзор наборов данных, имеющихся в свободном доступе и исследований потребления тепловой энергии населением по данным общедомовых приборов учёта. Исследованы зависимости изменения потребления тепловой энергии от метеорологических факторов и технико-экономических параметров зданий. Сбор данных увязан с конкретными способами оценки эксплуатационных характеристик зданий. Даны рекомендации по организации исследований по мониторингу зданий. Представлена динамика изменения теплопотребления и даны рекомендации по методологии исследований в рассмотренной предметной области. Таким образом, правильное понимание структуры и состава имеющихся наборов данных позволит получить прочную теоретическую основу для повышения энергоэффективности.

теплогидравлический режим, наборы данных о потреблении энергии в зданиях, автоматизированное управление.

Основные результаты

- Определены цели и результаты теплового мониторинга многоквартирных зданий.
- Сделан обзор моделей количественной оценки влияния свойств здания на потребление тепловой энергии.
- Предложена классификация используемых подходов к сбору данных для мониторинга энергоэффективности.
- Дана оценка полноты наборов данных.
- Используется обширная база данных потребления тепловой энергии для выявления закономерностей в данных и прогнозирования.
- Поведена визуализация сбора и оценки данных.

ВВЕДЕНИЕ

Модернизация зданий обеспечивает экономию тепловой энергии. Но определение приоритетов модернизации и расчёт ожидаемой экономии энергии и соотношения выгод-затрат может быть сложной, дорогостоящей и неопределённой задачей. Последние исследования показали существенные различия между ожидаемыми и фактическими эксплуатационными характеристиками зданий, как с точки зрения теплопотребления, так и комфорта внутри помещений. Для лучшего понимания различий между ожидаемыми и фактическими эксплуатационными характеристиками зданий необходимо изучить потребление тепловой энергии, уровень комфорта в помещениях, а также поведение жителей, их взаимодействие с технологиями рационального теплопотребления [1–2].

В последнее время было проведено значительное количество исследований по теме тепловой эффективности зданий в связи с растущей обеспокоенностью по поводу расточительного использования энергии и её постоянного негативного воздействия на окружающую среду [3].

За последние десятилетия потребление энергии в зданиях во всем мире неуклонно растёт, а на отопление, кондиционирование и вентиляцию воздуха приходится большая часть потребления энергии в зданиях [4]. Таким образом, одним из способов удовлетворения постоянно растущего спроса на

Графическая аннотация



Ключевые слова – адаптивное регулирование, тепловой комфорт, снижение теплопотребления, моделирование теплопотребления здания, источники энергии, тепловая энергия, жилой фонд, тепловой пункт, прогнозирование погоды, модель прогнозирующего управления, режим теплопотребления, гражданское строительство, компьютерный мониторинг, энергоэффективность, геoinформационные системы, теплопотребление,

дополнительное энергоснабжение является создание более энергоэффективных конструкций зданий с улучшенными свойствами энергосбережения [5].

Этому может помочь анализ данных о теплотреблении. Сейчас наблюдается рост доступности данных о характеристиках и оборудовании зданий, потреблении ими тепловой энергии, о погоде в местах сбора данных. Поэтому стало возможным разработка статистических методов и алгоритмов, которые связывают характеристики зданий и меры по ремонту и модернизации [6]. В статье мы исследуем потенциал использования наборов данных для прогнозирования ожидаемой экономии тепловой энергии для большого числа многоэтажных жилых зданий. Мы показываем, что данные о зданиях, полученные с помощью статистических оценок, могут дать представления об экономии энергии в тех случаях, когда детальный тепловой аудит и физическое моделирование нецелесообразны, как по затратам, так и по предполагаемому затраченному времени.

Вдохновлённые растущей актуальностью общедоступных наборов данных, мы решили провести обзор известных наборов данных в области теплотребления зданий. Насколько нам известно, <https://sys-engine.ru/> – это первая платформа, которая предоставляет всесторонний и универсальный обзор наборов данных о потреблении тепловой энергии в зданиях, их применении и будущих тенденциях. Обрисованы будущие направления улучшения использования наборов данных и, следовательно, улучшения теплосбережения.

Цель данной работы – дать обзор и классификацию доступных методов мониторинга, уделяя особое внимание методам сбора данных о потреблении тепловой энергии, определение наиболее эффективных способов мониторинга теплотребления зданий и внедрение их в обычную практику.

Использование перспективных технологий теплосбережения в новых и ранее построенных зданиях обещает не только снизить потребление тепловой энергии, но и создать хорошую внутреннюю среду для жителей. За последние четверть века в стремлении достичь максимальный комфорт в холодное время года было разработано большое количество новых технологий, например, стеклопакеты с двойным и тройным остеклением, фотоэлектрические преобразователи, высокоэффективные методы сжигания ископаемого топлива и тому подобные. Но внедрение технологий сопряжено с трудностями из-за неопределённых сроков окупаемости, стоимостью ограждающих конструкций и привычкой жить расточительно. Кроме того, прошлые и текущие исследования показали различия между требуемыми и фактическими эксплуатационными характеристиками зданий, как с точки зрения теплотребления, так и комфорта, что вызвано поразительным поведением жителей, их негативным влиянием эксплуатацию

зданий, приводящим к разрушению ограждающих конструкций и систем теплоснабжения [7].

Статья состоит из следующих разделов. В первой части даётся обзор методов сбора данных и подходы к классификации методов мониторинга. Представлены и кратко объяснены этапы мониторинга и оценки энергоэффективности зданий, включая выбор способов данных, что и является целью данной статьи. В разделе 2 представлен обзор наборов данных для мониторинга зданий. В разделе 3 представлен пример визуализации данных для оценки теплового комфорта и энергоэффективности. Наконец, в последнем разделе представлены некоторые полезные ссылки на работы, в которых использован новый подход, связанный с применением нейронных сетей и машинного обучения в повышении тепловой эффективности жилых зданий.

I. ОБЗОР МЕТОДОВ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Мониторинг энергоэффективности здания может носить различный характер в зависимости от цели: научный, диагностический или прогнозный. Научный интерес связан с проверкой эксплуатационных характеристик зданий. Диагностика эксплуатационных характеристик здания полезна для выработки управленческих решений по ремонту и повышению энергоэффективности. Прогноз потребления тепловой энергии необходим для будущего ресурсного обеспечения [8].

Количественные методы исследования направлены на поиск статистических взаимосвязей в численных данных [9]. Объективные данные основаны на измерениях физических параметров. В области эксплуатационных характеристик зданий количественные данные могут использоваться для анализа потребления тепловой энергии и его взаимосвязи с эксплуатацией здания и комфортом. Субъективные данные предоставляются людьми, основаны на некотором феноменологическом опыте, объясняют меньшее число объектов, и чаще всего относятся к оценке комфортности проживания. Конечно, они снижают статистическую значимость данных, но приводит к более глубокому пониманию предмета исследования. К участию в исследовательском проекте важно привлечь самих жителей, чтобы уменьшить вероятность того, что они откажутся от решений по повышению энергоэффективности своих домов или будут недовольны результатом [10].

Чтобы определить методы мониторинга, которые будут использоваться при оценке энергоэффективности здания, нужно определить цель оценки (повышение эффективности, проверка эффективности, будущие проекты), аудиторию, характер исследования, используемые показатели, глубину и методы сбора данных.

Существует два основных метода сбора данных для оценки теплового комфорта: измерения параметров внутри помещений с опросом жителей и регистрация объективных данных с общедомовых приборов учёта [11]. Для мониторинга эксплуатационных характеристик зданий разработано неслабое количество методик. Однако большинство из них являются дорогостоящими, трудоёмкими, интрузивными или требуют специальных знаний для анализа собранных данных. Их применение на практике исчезающе мало. Примером может служить работа [12], в которой изучено влияние восьми входных переменных (относительная компактность, площадь поверхности, площадь стен, площадь крыши, общая высота, ориентация, площадь остекления, распределение площади остекления) на отопление и охлаждение жилых помещений здания. Исследована сила связи каждой входной переменной с каждой из выходных переменных, используя различные классические и непараметрические инструменты статистического анализа, чтобы выявить наиболее сильно связанные входные переменные. Дано сравнение классического регрессионного подхода с мощным современным нелинейным непараметрическим методом случайного леса для оценки отопления и охлаждения. Всестороннее моделирование более чем полтысячи различных жилых зданий показало, что вполне возможно предсказание значений выходных переменных с малыми отклонениями средней абсолютной ошибки от начальных значений.

Долгосрочные измерения необходимы, когда целью мониторинга является определение эксплуатационных характеристик здания в течение достаточно длительного периода времени, в течение нескольких лет. Эти измерения возможны, когда в зданиях установлены и исправно функционируют общедомовые приборы учёта. Сами по себе долгосрочные измерения могут многое сказать об эксплуатационных характеристиках здания. Анализ результатов измерений может дать представление о проблемах с температурой в здании, например, о том, что в помещениях слишком холодно или слишком тепло. Учитывая объём данных, которые могут быть собраны, долгосрочные измерения дают много информации об эксплуатационных характеристиках здания [13].

Обычный сбор данных заключается в измерении энергопотребления за сутки и на регулярной основе. Этот способ является простым и недорогим, однако его главный недостаток заключается в том, что во время измерения и считывания показаний могут возникать ошибки [14 – 15]. При наличии дополнительных счётчиков ошибки можно быстро выявить, но установка дополнительных счётчиков является дорогостоящей и потребует обеспечения безопасности и функционирования энергетических систем здания. Для оценки эффективности

использования счётчиков необходимо, по крайней мере, снимать показания несколько раз в день, чтобы вовремя заметить аномальные показания.

Когда требуется более подробная информация о теплотреблении, возникает необходимость более частого сбора данных в течение очень длительного периода времени. Преимущество этого подхода в том, что он даёт дополнительную информацию о динамике изменения теплотребления и комфорте, внутренних и наружных условиях эксплуатации здания. Он также может сам по себе рассказать о том, как эксплуатируется здание [16]. Например, в выходные и праздничные дни потребление энергии значительно отличается от будней, и можно приблизительно рассчитать возможную экономию энергии при более эффективном управлении теплотреблением. Кроме долгосрочного анализа и мониторинга, более частый сбор данных может своевременно выявить неэффективность и отказы систем сбора данных.

Тепловой комфорт зависит от взаимодействия людей со зданием и их ожиданий, основанных на изменении погоды [17]. Связь между погодными условиями и энергопотреблением была давно и неоднократно доказана [18–19]. По этой причине сбор данных о погоде считается крайне важным при изучении поведения пользователей. Кроме того, характеристики существующих и вновь построенных домов зависят от последствий изменения климата. Соответственно, при сборе новых баз данных о потреблении энергии в этих домах следует учитывать погодные условия, которые дают определённые последствия глобального изменения климата, а не только учёт исторической климатической информации [20]. Исследования влияния изменения климата на энергопотребление зданий показывают, что число внезапных перепадов температуры будет только расти. Поэтому важно внедрять информацию о погоде в системы регулирования отопления, чтобы адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям [21].

Поскольку температура наружного воздуха является единственной независимой переменной в адаптивном уравнении, очень важен способ её определения [22]. Для мониторинга можно использовать как текущее значение среднесуточной температуры, так и результат непосредственного измерения её датчиком. Для анализа имеется возможность получения значения наружной температуры по данным Росгидрометцентра с его сайта <https://meteoinfo.ru/>. Доступна как среднесуточная температура, так и измеренная каждые три часа, то есть восемь значений в сутки [23].

II. МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В настоящее время в области теплоэнергетики, окружающей среды и устойчивого развития актуальна разработка наборов данных и размещение их в

открытом доступе. Более того, необходимо разрабатывать инструменты, помогающие пользователям лучше понимать показатели теплотребления, визуализировать их, и в дальнейшем внедрять новые стратегии, которые помогают улучшить поведение жителей и сократить потери энергии. В связи с этим, в целях изучения способов экономии тепловой энергии и понимания динамики теплотребления в зданиях, по всему миру были собраны наборы данных. Это огромное количество данных, включая многомерные временные ряды и характеристики зданий. Рис. 1 представляет собой блок-схему процесса сбора данных, а также связанные с ней модули, необходимые для предварительной обработки, анализа и интерпретации моделей потребления энергии.

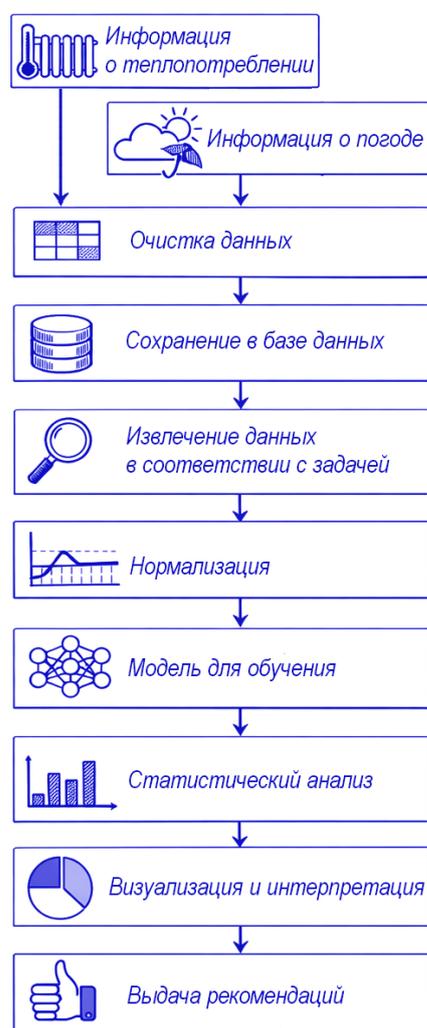


Рис. 1. Представление системы сбора данных о потреблении энергии с соответствующими модулями

Это общее представление, которое можно использовать для различных приложений.

Для лучшего понимания различий между реальным теплотреблением многоэтажных жилых зданий и ожидаемой экономией тепловой энергии при

эксплуатации зданий необходимо следить за потреблением энергии, поведением жителей, а также за создаваемым комфортом проживания. Для этого сформированы крупномасштабные наборы данных, к примеру, [24–25], где представлено потребление энергии с одинаковыми интервалами выборки более чем в 1200 домохозяйствах в течение длительного периода сбора данных, который составляет более четырех лет.

Мониторинг может быть основан на данных о потреблении тепловой энергии в результате коммерческого учёта с помощью общедомовых приборов. Один из таких наборов данных опубликован в IEEE Dataport [26]. Но теплотребление в зданиях зависит от множества факторов, которые необходимо объединить для составления полных наборов данных о потреблении энергии. В работе [27] это называется мультимодальным сбором данных, что означает просто сбор нескольких типов данных для эффективного решения задач по энергосбережению или других связанных с этим приложений. Дополненные данные представлены в базе [28].

Дополнив базу техническими характеристиками зданий, например, по данным сайта Фонда развития территорий фр.т.рф, можно количественно оценить вклад характеристик здания и социальных факторов в теплотребление и создать многомерную регрессионную модель с численными (например, теплотребление, наружная температура) и категориальными переменными (например, тип отопительной системы, материал крыши и стен) для изучения динамики и прогнозирования энергопотребления [29].

В связи с широким распространением интеллектуальных счетчиков и датчиков, использование наблюдений за потреблением тепловой энергии становится абсолютно необходимым для выявления аномального её использования [30–31]. В частности, методы раннего обнаружения могут быть использованы для выявления большого количества прорывов теплотрасс. Кроме того, обнаружение аномалий может позволить понять поведение жителей в области энергопотребления и быть в курсе непредсказуемых значений потребления энергии, приводящим к большим потерям [32]. Были изучены и внедрены различные подходы к интеллектуальному анализу данных для обнаружения аномальных событий в процессе энергопотребления [33]. Но чтобы набор данных можно было корректно и эффективно использовать, он должен соответствовать некоторым требованиям. В частности, для детализации энергопотребления наборы данных должны включать как агрегированные, так и индивидуальные данные. Необходимо также получать данные о потреблении энергии в различных частях здания, а также о состоянии окружающей среды. Для обнаружения аномалий крайне важно, чтобы в него были включены

метки с указанием нормального и аномального уровней потребления для машинного обучения. И, наконец, для прогнозирования потребления энергии период сбора данных должен быть длительным. В целом, обнаружение аномального энергопотребления играет важную роль в сокращении потерь энергии.

Тем не менее, стоит отметить, что напроочь отсутствуют аннотированные наборы данных, предназначенные для обнаружения аномалий теплопотребления.

Учитывая недостатки современных наборов данных, в энергетической лаборатории университета Катара была создана база QUD (<http://em3.i-know.org/datasets/>). Это набор данных о потреблении всех видов энергии различными устройствами (кондиционером, системой отопления, осветительными приборами) в дополнение к погодным данным, включая влажность, температуру, и проч. В наборе данных есть несколько сценариев использования, таких как выявление отклонений в потреблении, тестирование рекомендательная система и оценка инновационных инструментов визуализации. Пожалуй, QUD является одним из первых аннотированных репозиторий, предназначенных для обнаружения аномалий в энергопотреблении.

Для того чтобы разметить данные наблюдений, в QUD используется идея микромоментов, которая помогает определить моменты полезного или неправильного использования [34]. В частности, микромоменты используются для получения точной статистики о потребителях [35]. Данные о потреблении энергии размечаются с помощью пяти классов микромоментов: «правильное использование», «включение», «выключение», «чрезмерное потребление энергии» и «потребление на улице».

Понимание и улучшение поведения жителей в области теплопотребления является одним из успешных подходов к снижению потребления энергии и стимулированию энергосбережения, примерно до уровня 20–50 % [36]. Таким образом, сбор и включение данных о поведении конечных пользователей в модель энергоэффективности может значительно сократить количество потраченной впустую энергии. Это можно сделать путем сбора информации, связанной с их предпочтениями и привычками [37].

III. ПРИМЕР ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ, ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА

Визуализация считается наиболее эффективным способом обработки больших наборов данных с целью интерактивного и совершенного предоставления информации конечным пользователям, потребителям и заинтересованным стейкхолдерам. Инструменты, методы и программное обеспечение, используемые для визуализации потребления энергии, требуют

дальнейшего совершенствования для того чтобы в доступной форме демонстрировать большие затраты энергии. В этой связи анализ микромоментов с временными рядами теплопотребления и наружной температуры может служить новой идеей визуализации.

На Рис. 2 приведены нормализованные значения потребления тепла Q и температуры наружного воздуха T для одного отопительного сезона. Нормализация выполняется по известной формуле:

$$Q = (q - w) / (s \delta)$$

и приводит переменные к одинаковому масштабу при сохранении статистических характеристик, где w – среднее значение для ряда значений потребления тепла q , δ – стандартное отклонение, s – площадь здания. Аналогичным образом нормализуется температура наружного воздуха, но на площадь она конечно не делится. Для сравнения графиков температура взята с обратным знаком, поскольку при повышении температуры потребление тепловой энергии должно уменьшаться.

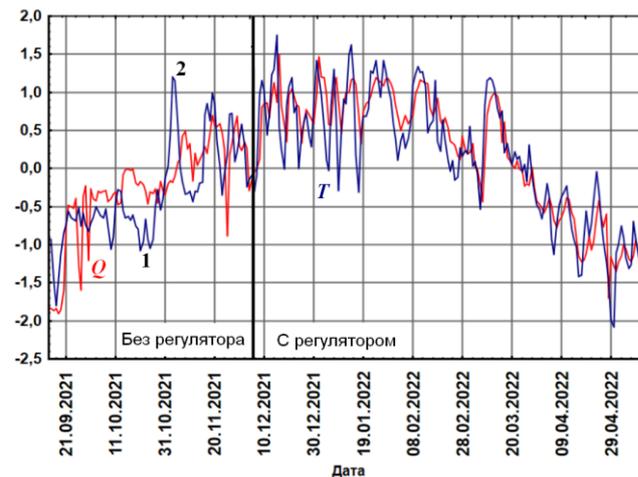


Рис. 2. Нормализованные значения потребления тепла Q и обратной температуры наружного воздуха T

В левой части Рис. 2 приведены нормализованные значения переменных, когда регулятор в здании не установлен. Графики Q и обратной температуры T существенно отличаются. Очевиден перетоп (микромомент 1) или замерзание (микромомент 2). На правой стороне Рис. 2 показаны те же нормализованные значения, но с установленным погодным регулятором. Из сравнения левой и правой частей рисунка видно, что, несмотря на плохую настройку регулятора, графики Q и обратной температуры T стали значительно меньше отличаться, хотя регулятор плохо обрабатывает резкие перепады уличной температуры. Потребление тепловой энергии также увеличивается в дни резкого потепления (минимум на температурных графиках), что может быть объяснено сбросом тепла в атмосферу при открывании окон жителями. Таким образом, очевидно, что в данном случае в здании решена проблема

экономии тепловой энергии, но не повышения уровня комфорта.

Можно сделать вывод о том, что отслеживание микромоментов во временных рядах облегчает выявление моментов аномального потребления тепловой энергии, и вследствие этого может помочь выработать точные рекомендации, помогающие сократить потери энергии. Более того, это помогает жителям понять свои потребительские предпочтения, повышает их осведомлённость и, следовательно, побуждает их улучшать свое поведение за счёт использования рекомендаций. Понятно, что использование микромоментов для обнаружения аномального потребления может быть расширено на выявление других видов аномалий, например, для обнаружения работы кондиционера при открытых дверях и окнах. Таким образом, жители будут получать соответствующие уведомления и советы, например, закрывать двери или окна, чтобы сократить количество потраченной впустую энергии.

Итак, новый способ визуализации, основанный на анализе микромоментов, позволяет людям понять свои собственные показатели энергопотребления и соответствующим образом интерпретировать своё поведение в отношении потребления энергии. Более того, это помогает им легко получать статистику об их фактическом потреблении энергии.

IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Важное направление, которое может улучшить качество и использование наборов данных о потреблении энергии, основано на внедрении алгоритмов машинного обучения, которые могут значительно помочь в снижении энергопотребления [38]. Поэтому первостепенное значение имеет стимулирование новых достижений и задач, связанных с нейросетевыми моделями.

Использование генерирующих моделей, таких как генерирующие состязательные сети, могут значительно улучшить качество собираемых данных за счёт заполнения неполных данных о потреблении энергии из-за потери данных, произошедшей на этапе сбора, и, следовательно, привести к лучшему использованию полученных наборов данных в различных приложениях [39].

В работе [40] предложено интеллектуальное оптимизационное управление процессом отопления на основе нейронной сети. Вместо реального здания используется его модель, а в качестве прогноза погоды используется нейросетевая модель. Управление обеспечивает снижение потребления тепловой энергии при одновременном повышении комфорта пользователя.

Кроме использования моделей глубокого обучения для выявления аномалий потребления энергии [41] и классификации микромоментов энергопотребления могут быть применены другие алгоритмы машинного обучения с различными параметрами конфигурации [42]. Выбор подходящей модели машинного обучения в основном основан на обеспечении наилучшего компромисса между эффективностью идентификации и сложностью вычислений [43]. Всё это позволяет лучше использовать собранные наборы данных для выявления аномального энергопотребления [44].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребление энергии и эффективное использование централизованного теплоснабжения влияют на экономику и окружающую среду, и поэтому требуют более строгого внимания к решению вопросов градостроительства. Необходимы управленческие решения, которые позволят существенно снизить потери тепловой энергии. Сбор данных о теплотреблении в масштабах городов, использование технически и экономически обоснованного способа оценки эффективности позволят планировать мероприятия по рациональному использованию энергетических ресурсов. В настоящее время оценка энергоэффективности зданий не учитывает динамику потребления тепловой энергии. Уточнённые методы оценки позволяют одномоментно экономить капиталовложения и обеспечивать эффективное потребление тепловой энергии.

Исходя из необходимости всестороннего анализа существующих баз данных, в данной работе проведён обзор, изучение и визуализация наборов данных о потреблении энергии в зданиях. Это исследование направлено на внедрение мониторинга эффективности зданий в практику их эксплуатации. Выявив наиболее перспективные подходы, в исследовании предлагается классификация методов оценки и сбора данных, которая облегчит эту задачу, определяются направления дальнейшего совершенствования наборов данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ефимов Б.В., Кузнецов Н.М., Победоносцева В.В. Эффективность энергосберегающих мероприятий в бюджетной сфере мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9. – № 3-16. – С. 76-86. – eLIBRARY ID: 36474392. – Doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.76-86.
- [2] Fedorcak-Cisak M., Radziszewska-Zielina E., Dechnik M., Buda-Chowaniec A., Sadowska B., Ciula M., Kapecki T. User Comfort Evaluation in a Nearly Zero-Energy Housing Complex in Poland: Indoor and Outdoor Analysis // Energies. – 2025. – V. 18. – № 19:5209. – Doi: 10.3390/en18195209.
- [3] Подлесных А.А. Повышение энергоэффективности объектов жилищно-коммунального комплекса // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. – Т. 9 – № 5(43) – с. 126-133.

- [4] Белый А. Проблемы повышения энергоэффективности жилых многоквартирных зданий в условиях текущих цен на тепловую энергию в Казахстане // Центральноазиатский журнал исследования климата и устойчивого развития. – 2024. – Т. 3. – № 2. – С. 24-44. – eLIBRARY ID: 79828196. – EDN: MJAUMT. – Doi: 10.29258/cajscr/2024-r1.v3-2/24-44.rus.
- [5] Черноиван Н.В., Павлова И.П. Исследование энергетической эффективности эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий, прошедших тепловую модернизацию // Вестник брестского государственного технического университета. – 2025. – № 1(136). – С. 53-59. – eLIBRARY ID: 82341190. – EDN: AXZХОQ. – Doi: 10.36773/1818-1112-2025-136-1-53-59.
- [6] Зорин П.А., Стукач О.В. Статистическое моделирование тепловых характеристик жилых домов на основе данных теплосчетчиков / Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Тринадцатой Международной конференции. Томский государственный университет. Томск, 07-09 сентября 2020. – С. 11. – eLIBRARY ID: 44189681.
- [7] Korniyenko S.V. Renovation of apartment buildings in Russia // Construction of unique buildings and structures. – 2018. – № 5 (68). – С. 15-23. – eLIBRARY ID: 36318476. – Doi: 10.18720/CUBS.68.2. (Корниенко С.В. Реновация жилых зданий в России).
- [8] Зорин П.А., Купреков С.В., Пуговкин А.В., Стукач О.В. Контроль энергоэффективности теплоснабжения зданий типовой застройки // Электронные средства и системы управления / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск). – 2018. – N 1-2. – С. 302-305. – eLIBRARY ID: 37384589.
- [9] Стукач О.В., Зорин П.А. Дисперсионный анализ данных учета тепловой энергии в г. Томске / Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА). Материалы III Международной научно-практической конференции. – Минск, 21-22 апреля 2022. – С. 140-143. – eLIBRARY ID: 8504165.
- [10] Fotopoulou E., Zafeiropoulos A., Terroso F. et al. Data aggregation, fusion and recommendations for strengthening citizens energy-aware behavioural profiles / 2017 Global Internet of Things Summit (GloTS). – Pp. 1-6. (Агрегация, объединение данных и рекомендации по улучшению поведенческих характеристик граждан, ориентированных на потребление энергии)
- [11] Зорин П.А., Стукач О.В. Дисперсионный анализ данных коммерческого учёта тепловой энергии в жилом фонде города Томска / Наука. Технологии. Инновации // Сборник научных трудов в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2019. – ISBN 978-5-7782-4007-0. – С. 72-75. – eLIBRARY ID: 41847032.
- [12] Tsanas A., Xifara A. Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools // Energy and Buildings. – 2012. – V. 49. № 6. – Pp. 560-567. – Doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.003. (Точная количественная оценка энергетических показателей жилых зданий с использованием инструментов статистического машинного обучения)
- [13] Стукач О.В., Зорин П.А., Ершов И.А. Использование метода сходящегося перекрестного отображения в задачах исследования взаимной зависимости температурных рядов / VI Международная научно-техническая конференция "Проблемы машиноведения". Омск: Омский государственный технический университет, 22-23 марта 2022. – С. 228-234.
- [14] Федосин А.С., Федосин С.А. Очистка входных данных в автоматизированных системах контроля и учета энергоресурсов // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – Т. 14. – № 2. – С. 162-168.
- [15] Федосин А.С., Савкина А.В. Проблемы качества данных в автоматизированных системах коммерческого учета потребления энергоресурсов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2. – С. 158-164.
- [16] Попов И.Ю., Стукач О.В., Зорин П.А. Оценка качества данных коммерческого учёта тепловой энергии методом полной вариации распознавания ошибок // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9. – № 3. – С. 117-121. – DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-117-121. – eLIBRARY ID: 47923769.
- [17] Liu Y., Stouffs R., Tablada A., Wong N.H., Zhang J. Comparing micro-scale weather data to building energy consumption in Singapore // Energy and Buildings. – 2017. – № 152. – Pp. 776-791. (Сравнение небольших данных о погоде с потреблением энергии зданиями в Сингапуре)
- [18] Koci J., Koci V., Madera J., Cerny R. Effect of applied weather data sets in simulation of building energy demands: Comparison of design years with recent weather data // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – № 100. – Pp. 22-32. (Влияние применяемых наборов погодных данных в моделировании энергопотребления зданий: сравнение годов проектирования с последними данными о погоде).
- [19] Farah S., Whaley D., Saman W., Boland J. Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation, Energy and Buildings. – 2019. – № 183. – Pp. 749-760. (Интеграция изменений климата в метеорологические данные о погоде для моделирования энергетики зданий).
- [20] Зорин П.А., Стукач О.В. Анализ влияния погодных условий на динамику тепловой энергии в жилом фонде города Томск / Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции. – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского. – 2020. – С. 365-368. – ISSN 2500-1248. – eLIBRARY ID: 45557868.
- [21] Jalali Z., Shamseldin A.Y., Ghaffarianhoseini A. Impact assessment of climate change on energy performance and thermal load of residential buildings in New Zealand // Building and Environment. – 2023. – V. 243. – Paper 110627. – Doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110627.
- [22] Lupato G., Manzan M. Italian TRYs: New weather data impact on building energy simulations // Energy and Buildings. – 2019. – № 185. – Pp. 287-303. (Влияние новых погодных данных на моделирование энергетики зданий).
- [23] Стукач О.В., Зорин П.А., Фёдоров Н.Г. Результаты энергосберегающего регулирования тепловой энергии на примере Томска и Буденновска // Динамика систем, механизмов и машин. – 2023. – № 1. – Т. 11. – С. 53-56. – eLIBRARY ID: 64903450. – DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-53-56.
- [24] Barker S., Mishra A., Irwin D., Cecchet E., Shenoy P., Albrecht J. Smart: An open data set and tools for enabling research in sustainable homes / Proceedings of the 2012 Workshop on Data Mining Applications in Sustainability. – 2012. – Pp. 1-6. (Набор открытых данных и инструментов для проведения исследований в области устойчивого жилища).
- [25] Parson O., Fisher G., Hersey A., Batra N., Kelly J., Singh A. et al. Dataport and NILMTK: A building data set designed for non-intrusive load monitoring / 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). – 2015. – Pp. 210-214. (Dataport и NILMTK: Набор данных о зданиях, предназначенный для неинтрузивного мониторинга нагрузки).
- [26] Zorin P., Stukach O. Data of heating meters from residential buildings in Tomsk (Russia) for statistical modeling of the thermal characteristics of buildings / IEEE Dataport. – 2020. – [Online]. – Doi: 10.21227/3r4e-ch18.
- [27] Himeur Y., Alsalemi A., Al-Kababji A., Bensaali F., Amira A. Data fusion strategies for energy efficiency in buildings: Overview, challenges and novel orientations // Information Fusion. – 2020. – Pp. 1-36. (Стратегии объединения данных для повышения энергоэффективности зданий: обзор, проблемы и новые направления).
- [28] Stukach O., Zorin P. Long-Term Data from the Heat Meters in Residential Buildings Depending on the Outside Temperature and Characteristics of Buildings / IEEE Dataport. – April 13, 2021. – Ddoi: 10.21227/cw53-rr81. – <http://ieee-dataport.org/4034>.
- [29] Зорин П.А., Стукач О.В. База данных потребления тепловой энергии многоэтажными жилыми зданиями в зависимости от метеорологических факторов и характеристик зданий. – Per. № 25452. – DOI: 10.12731/ofernio.2025.25452. – Навигатор в мире

- науки и образования. – 2025. – № 01(66). – С. 119-124. – Бюллетень "Хроники Объединенного фонда электронных ресурсов "Наука и образование"". – 2025. – № 03(190).
- [30] Seem J.E. Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings // *Energy and Buildings*. – 2007. – № 39(1). – Pp. 52-58. (Использование интеллектуального анализа данных для выявления аномального потребления энергии в зданиях).
- [31] Weng Y., Zhang N., Xia C. Multi-agent-based unsupervised detection of energy consumption anomalies on smart campus // *IEEE Access*. – 2019. – № 7. – Pp. 2169-2178. (Мультиагентное обнаружение аномалий энергопотребления без контроля в умном кампусе).
- [32] Nordahl C., Persson M., Grahn H. Detection of residents' abnormal behaviour by analysing energy consumption of individual households / 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). – 2017. – Pp. 729-738. (Выявление аномального поведения жителей при анализе потребления энергии отдельными домохозяйствами).
- [33] Janetzko H., Stoffel F., Mittelstadt S., Keim D.A. Anomaly detection for visual analytics of power consumption data // *Computers & Graphics*. – 2014. – № 38. – Pp. 27-37. (Обнаружение аномалий для визуальной аналитики данных о потреблении энергии).
- [34] Alsalemi A., Ramadan M., Bensaali F., et al. Endorsing domestic energy saving behavior using micro-moment classification // *Applied Energy*. – 2019. – № 250. – Pp. 1302-1311.
- [35] Himeur Y., Alsalemi A., Bensaali F., Amira A. A novel approach for detecting anomalous energy consumption based on micro-moments and deep neural networks // *Cognitive Computation*. – 2020. – Pp. 1-23. (Новый подход к обнаружению аномального потребления энергии, основанный на микромоментах и глубокой нейронной сети).
- [36] Ge S., Li J., Liu H., Liu X., Wang Y., Zhou H. Domestic energy consumption modeling per physical characteristics and behavioral factors // *Energy Procedia (Innovative Solutions for Energy Transitions)*. – 2019. – № 158. – Pp. 2512-2517. (Моделирование внутреннего энергопотребления с учетом физических характеристик и поведенческих факторов).
- [37] Delzende E., Wu S., Lee A., Zhou Y. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review, *Renewable and Sustainable // Energy Reviews*. – 2017. – № 80. – Pp. 1061-1071. (Влияние поведения жильцов на энергетический анализ зданий: обзор исследований, посвященных возобновляемым и устойчивым источникам энергии).
- [38] Stukach O.V., Ershov I.A., Dvurechenskaya N.A. Neural Network Simulation of a Residential Building for a Data-Driven Thermal Consumption / 2025 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference, 11-13 November 2025, Omsk, Russian Federation. – 2025. – Pp. 1-4, doi: 10.1109/Dynamics68764.2025.11302190. (Нейросетевое моделирование теплопотребления жилого здания на основе данных).
- [39] Fekri M., Ghosh A.M., Grolinger K. Generating energy data for machine learning with recurrent generative adversarial networks // *Energies*. – 2019. – V. 12. – P. 13. (Генерация энергетических данных для машинного обучения с помощью рекуррентных генеративных состязательных сетей).
- [40] Chen-xi J., Ping J., Shi L. Intelligent control method of heating process including model prediction and climate compensation / 2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), Hanoi, Vietnam. – 2020. – Pp. 50-55. – Doi: 10.1109/ICAMechS49982.2020.9310086.
- [41] Стукач О.В., Ершов И.А., Кутузов Д.В. LSTM-модель потребления тепловой энергии в многоквартирном жилом здании // *Системная инженерия и инфокоммуникации*. – 2025. – № 4. – С. 11-14. – <https://sys-engine.ru/index.php/SEI/article/view/35>.
- [42] Li G., Kou C., Wang H. Estimating city-level energy consumption of residential buildings: A life-cycle dynamic simulation model // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – 240. – Pp. 451-462. (Оценка энергопотребления жилых зданий на уровне города: динамическая имитационная модель жизненного цикла).
- [43] Стукач О.В., Карапиш Е.А. Идентификация стохастической модели теплопотребления в многоквартирных жилых зданиях города / Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2024) : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-26 апр. 2024 г. / Белорус. гос. ун-т ; ред. В.В. Скаун. – Минск : БГУ, 2024. – С. 172-175. – ISBN: 978-985-881-636-0. – eLIBRARY ID: 67917843. – EDN: HFIKCA.
- [44] Стукач О.В., Ершов И.А. Нейросетевая модель жилого здания как объекта управления для погодозависимого регулятора тепловой энергии // *Динамика систем, механизмов и машин: сборник трудов XIX Международной IEEE научно-технической конф., г. Омск, Омский государственный технический университет, 11-13 ноября 2025*. – Омск: издательство ОмГТУ. – 2025. – Т. 13 – N 3. – С. 82-87. – DOI: 10.25206/2310-9793-2025-13-3-82-87. – ISSN: 2310-9793.

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@icce.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, ORCID: 0000-0003-1524-6508.

Data collection of the consumption of thermal energy in the residential houses of the city

O.V. Stukach ^{1,2}, I.A. Ershov ²

¹National Research University Higher School of Economics
²Novosibirsk State Technical University

Abstract – Monitoring of heat supply depending on the operational characteristics of buildings is necessary to make and provide management decisions on the repair and improvement of energy efficiency for the residential houses. Therefore it is the subject of data-driven research. The paper discusses the problems of data collection on commercial accounting of thermal energy in multi-storey residential buildings on a whole city. A review and classification of data collection methods for monitoring heat consumption, comfortable living conditions, and building running are presented. A review of publicly available datasets and studies of heat energy consumption by the inhabitants based on data from household metering devices is given. The dependences of changes in heat energy consumption on meteorological factors and technical and economic parameters of buildings are investigated. Data collection is connected with specific assessing building performance. Recommendations on the research for monitoring buildings are given. The dynamics of heat consumption changes is presented. Recommendations on

the research methodology in the considered subject are given. Thus, a proper understanding of the available datasets composition will create a solid foundation for energy efficiency improving.

Keywords – adaptive regulation, thermal comfort, modeling of building heat consumption, energy sources, thermal energy, residential house, heat point, weather forecasting, heat consumption mode, predictive control model, civil engineering, computer monitoring, energy efficiency, geoinformation systems, heat consumption reduction, heat consumption, thermohydraulic mode, datasets on energy consumption in buildings, automated control.

References

- [1] Efimov B.V., Kuznetsov N.M., Pobedonostseva V.V. Efficiency of energy saving measures in the budget sphere of the Murmansk Region // Proceedings of the Kolsk Research Center of RAS. – 2018. – V. 9. – № 3-16. – Pp. 76-86. – eLIBRARY ID: 36474392. – Doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.76-86.
- [2] Fedorczak-Cisak M., Radziszewska-Zielina E., Dechnik M., Buda-Chowaniec A., Sadowska B., Ciula M., Kapecki T. User Comfort Evaluation in a Nearly Zero-Energy Housing Complex in Poland: Indoor and Outdoor Analysis // Energies. – 2025. – V. 18. – № 19:5209. – Doi: 10.3390/en18195209.
- [3] Podlesnykh A.A. Improving the energy efficiency of housing and communal complex facilities // International Journal of Information Technology and Energy Efficiency. – 2024. – V. 9 – № 5(43) – Pp. 126-133.
- [4] Belyi A. Problems of improving the energy efficiency of residential apartment buildings in the context of current prices for thermal energy in Kazakhstan // Central Asian Journal of Climate Research and Sustainable Development. – 2024. – V. 3. – № 2. – Pp. 24-44. – eLIBRARY ID: 79828196. – EDN: MJAUMT. – Doi: 10.29258/cajscr/2024-r1.v3-2/24-44.rus.
- [5] Chernoiivan N.V., Pavlova I.P. Investigation of the energy efficiency of operated large-panel residential buildings that have undergone thermal modernization // Bulletin of the Brest State Technical University. – 2025. – № 1(136). – C. 53-59. – eLIBRARY ID: 82341190. – EDN: AXZXOQ. – Doi: 10.36773/1818-1112-2025-136-1-53-59.
- [6] Zorin P.A., Stukach O.V. "Statistical modeling of the thermal characteristics of households based on the thermal meter dataset", 13 International conference on new information technologies in the investigation of complex structures. Tomsk State University, Tomsk, September 07-09, 2020, p. 11. – eLIBRARY ID: 44189681.
- [7] Korniyenko S.V. Renovation of apartment buildings in Russia // Construction of unique buildings and structures. – 2018. – № 5 (68). – C. 15-23. – eLIBRARY ID: 36318476. – Doi: 10.18720/CUBS.68.2.
- [8] Zorin P.A., Kuprekov S.V., Pugovkin A.V., Stukach O.V. Control of Energy Efficiency of Thermal Energy Supply for Typical Residential Buildings // Electron Instruments and Control Systems / Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. – 2018. – N 1-2. – P. 302-305. – eLIBRARY ID: 37384589.
- [9] O.V. Stukach, P.A. Zorin, "Dispersion Analysis of Thermal Energy Data in Tomsk", Proceedings of the III International Sci.-Pract. Conf. "Computer Technologies and Data Analysis - CTDA", Minsk, 21-22 April, 2022, pp. 140-143. – eLIBRARY ID: 48504165.
- [10] Fotopoulou E., Zafeiropoulos A., Terroso F. et al. Data aggregation, fusion and recommendations for strengthening citizens energy-aware behavioural profiles / 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS). – Pp. 1-6.
- [11] Zorin P.A., Stukach O.V. Dispersion analysis of data on commercial accounting of thermal energy in the residential houses of the city of Tomsk / Nauka. Technologies. Innovations. Proceedings in 9 volumes. – Novosibirsk, NSTU Publishing House. – 2019. – ISBN 978-5-7782-4007-0. – Pp. 72-75. – eLIBRARY ID: 41847032.
- [12] Tsanas A., Xifara A. Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools // Energy and Buildings. – 2012. – V. 49. № 6. – Pp. 560-567. – Doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.003.
- [13] O.V. Stukach, P.A. Zorin, I.A. Ershov, "The use of the convergent cross mapping method in the problems of studying the cross-dependence of temperature series", VI International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update" (MSTU-2022), March 22-23, 2022, Omsk, Russia. – eLIBRARY ID: 48607016.
- [14] Fedosin A.S., Fedosin S.A. Cleaning of input data in automated systems of control and accounting of energy resources // Infocommunication technologies. – 2016. – V. 14. – № 2. – Pp. 162-168.
- [15] Fedosin A.S., Savkina A.V. Data quality problems in automated commercial energy consumption accounting systems // Caspian Journal: Control and High Technologies. – 2014. – № 2. – Pp. 158-164.
- [16] I.Yu. Popov, O.V. Stukach, P.A. Zorin, "Evaluation of the Quality of Commercial Thermal Energy Accounting Data by Total Variation Outlier Recognizer", Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 117-121, DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-117-121.
- [17] Liu Y., Stouffs R., Tablada A., Wong N.H., Zhang J. Comparing micro-scale weather data to building energy consumption in Singapore // Energy and Buildings. – 2017. – № 152. – Pp.776-791.
- [18] Koci J., Koci V., Madera J., Cerny R. Effect of applied weather data sets in simulation of building energy demands: Comparison of design years with recent weather data // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – № 100. – Pp. 22-32.
- [19] Farah S., Whaley D., Saman W., Boland J. Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation, Energy and Buildings. – 2019. – № 183. – Pp. 749-760.
- [20] Zorin P.A., Stukach O.V. Analiz vliyaniya pogodnykh uslovii na dinamiku teplovoi energii v zhilom fonde goroda Tomsk / Innovative, information and comms tech: Proceedings of the XVII Int. sci.-pract. conf. – Moscow. – 2020. – C. 365-368. – ISSN 2500-1248. – eLIBRARY ID: 45557868.
- [21] Jalali Z., Shamseldin A.Y., Ghaffarianhoseini A. Impact assessment of climate change on energy performance and thermal load of residential buildings in New Zealand // Building and Environment. – 2023. – V. 243. – Paper 110627. – Doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110627.
- [22] Lupato G., Manzan M. Italian TRYs: New weather data impact on building energy simulations // Energy and Buildings. – 2019. – № 185. – Pp. 287-303.
- [23] Stukach O.V., Zorin P.A., Fedorov N.G. Outcomes of Energy-Saving Regulation of Thermal Energy on the Example of Tomsk and Budennovsk, Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – 2023. – № 1. – V. 11. – Pp. 53-56.
- [24] Barker S., Mishra A., Irwin D., Cecchet E., Shenoy P., Albrecht J. Smart: An open data set and tools for enabling research in sustainable homes / Proceedings of the 2012 Workshop on Data Mining Applications in Sustainability. – 2012. – Pp. 1-6.
- [25] Parson O., Fisher G., Hersey A., Batra N., Kelly J., Singh A. et al. Dataport and NILMTK: A building data set designed for non-intrusive load monitoring / 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). – 2015. – Pp. 210-214.
- [26] Zorin P., Stukach O. Data of heating meters from residential buildings in Tomsk (Russia) for statistical modeling of the thermal characteristics of buildings / IEEE Dataport. – 2020. – [Online]. – Doi: 10.21227/3r4e-ch18.
- [27] Himeur Y., Alsalemi A., Al-Kababji A., Bensaali F., Amira A. Data fusion strategies for energy efficiency in buildings: Overview, challenges and novel orientations // Information Fusion. – 2020. – Pp. 1-36.
- [28] Stukach O., Zorin P. Long-Term Data from the Heat Meters in Residential Buildings Depending on the Outside Temperature and Characteristics of Buildings / IEEE Dataport. – April 13, 2021. – Ddoi: 10.21227/cw53-rr81. – <http://iee-dataport.org/4034>.
- [29] Zorin P.A., Stukach O.V. Database of Heat Energy Consumption by Multi-Storey Residential Buildings Depending on Meteorological Factors and Building Characteristics. – Reg. № 25452. – Bulletin of the Chronicles of the United Fund of Electronic Resources "Science

- and Education". – 2025. – № 03(190). – Doi: 10.12731/ofernio.2025.25452.
- [30] Seem J.E. Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings // *Energy and Buildings*. – 2007. – № 39(1). – Pp. 52-58.
- [31] Weng Y., Zhang N., Xia C. Multi-agent-based unsupervised detection of energy consumption anomalies on smart campus // *IEEE Access*. – 2019. № 7. – Pp. 2169-2178.
- [32] Nordahl C., Persson M., Grahn H. Detection of residents' abnormal behaviour by analysing energy consumption of individual households / 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). – 2017. – Pp. 729-738.
- [33] Janetzko H., Stoffel F., Mittelstadt S., Keim D.A. Anomaly detection for visual analytics of power consumption data // *Computers & Graphics*. – 2014. – № 38. – Pp. 27-37.
- [34] Alsalemi A., Ramadan M., Bensaali F., et al. Endorsing domestic energy saving behavior using micro-moment classification // *Applied Energy*. – 2019. – № 250. – Pp. 1302-1311.
- [35] Himeur Y., Alsalemi A., Bensaali F., Amira A. A novel approach for detecting anomalous energy consumption based on micro-moments and deep neural networks // *Cognitive Computation*. – 2020. – Pp. 1-23.
- [36] Ge S., Li J., Liu H., Liu X., Wang Y., Zhou H. Domestic energy consumption modeling per physical characteristics and behavioral factors // *Energy Procedia (Innovative Solutions for Energy Transitions)*. – 2019. – № 158. – Pp. 2512-2517.
- [37] Delzendeh E., Wu S., Lee A., Zhou Y. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review, Renewable and Sustainable // *Energy Reviews*. – 2017. – № 80. – Pp. 1061-1071.
- [38] Stukach O.V., Ershov I.A., Dvurechenskaya N.A. Neural Network Simulation of a Residential Building for a Data-Driven Thermal Consumption / 2025 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference, 11-13 November 2025, Omsk, Russian Federation. – 2025. – Pp. 1-4, doi: 10.1109/Dynamics68764.2025.11302190.
- [39] Fekri M., Ghosh A.M., Grolinger K. Generating energy data for machine learning with recurrent generative adversarial networks // *Energies*. – 2019. – V. 12. – P. 13.
- [40] Chen-xi J., Ping J., Shi L. Intelligent control method of heating process including model prediction and climate compensation / 2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), Hanoi, Vietnam. – 2020. – Pp. 50-55. – Doi: 10.1109/ICAMechS49982.2020.9310086.
- [41] Stukach O.V., Ershov I.A., Kutuzov D.V. LSTM-model of thermal energy consumption in a multi-storey residential building // *Systems Engineering and Infocommunications*. – № 4(4). – Pp. 11-14.
- [42] Li G., Kou C., Wang H. Estimating city-level energy consumption of residential buildings: A life-cycle dynamic simulation model // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – 240. – Pp. 451-462.
- [43] Stukach O.V., Karapish E.A. Identification of a stochastic model of heat consumption in multi-storey residential buildings in the city / Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2024): Proceedings of the IV Int. sci.-pract. conf., Minsk, April 25-26, 2024 / Belarusian State University. – Pp. 172-175. – ISBN: 978-985-881-636-0. - eLIBRARY ID: 67917843. – EDN: HFIKCA.
- [44] Stukach O.V., Ershov I.A. Neural network model of a residential building as a control object for a weather-dependent thermal energy regulator / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines Conference, 11-13 November 2025, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. – 2025. – V. 13. – № 3. – Pp. 82-87. – Doi: 10.25206/2310-9793-2025-13-3-82-87.

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@ieec.org, ORCID: 0000-0001-6845-4285.

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

Система обучения сжатию изображений с управляемыми потерями

С.Н. Кочергин, А.Р. Мамлеева

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – В работе представлена интеллектуальная система для обучения методам сжатия изображений с управляемыми потерями. Актуальность исследования обусловлена ростом объёмов визуальных данных и необходимостью эффективного их хранения и передачи. Разработанная система представляет собой интерактивное веб-приложение, которое визуализирует принципы работы алгоритмов сжатия, таких как JPEG, и позволяет пользователю экспериментировать с ключевыми параметрами, влияющими на соотношение «степень сжатия – качество изображения». В рамках системы реализованы модули для настройки коэффициента квантования, выбора цветового пространства и оценки метрик искажения (PSNR, SSIM). Проведенные эксперименты демонстрируют, что интерактивное обучение с использованием предложенной системы способствует более глубокому пониманию компромиссов, присущих сжатию с потерями по сравнению с традиционным изучением теоретического материала на лекции. Система предназначена для использования в образовательных целях студентами, изучающими компьютерную графику, обработку изображений и мультимедийные технологии.

Ключевые слова–сжатие изображений, сжатие с потерями, JPEG, обучение, интеллектуальная система, PSNR, SSIM.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост разрешения и объёма цифровых изображений требует применения эффективных алгоритмов сжатия. В то время как сжатие без потерь (например, PNG) сохраняет все исходные данные, сжатие с управляемыми потерями (например, JPEG) достигает значительно более высоких коэффициентов сжатия за счёт необратимого отбрасывания части визуальной информации, малозаметной для человеческого восприятия [1, 2]. Понимание принципов и компромиссов такого сжатия является важной задачей в подготовке специалистов в области информационных технологий.

Существующие образовательные материалы зачастую носят теоретический характер и не предоставляют возможности для наглядного экспериментирования с параметрами сжатия [3]. Это затрудняет усвоение взаимосвязи между степенью сжатия, возникающими артефактами и объективными метриками качества. Целью данной работы является разработка интеллектуальной системы, которая

предоставляет интерактивную среду для обучения сжатию изображений с управляемыми потерями. Задачи исследования включают реализацию основных этапов алгоритма JPEG, создание веб-интерфейса для управления параметрами сжатия, интеграцию метрик оценки качества и педагогическую оценку эффективности системы.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разрабатываемая система должна решать следующие задачи:

1. Предоставить пользователю возможность загружать собственные изображения для обработки.
2. Реализовать визуализацию основных этапов алгоритма JPEG: преобразование цветового пространства, дискретное косинусное преобразование (ДКП) [4], квантование и энтропийное кодирование.
3. Обеспечить интерактивное управление ключевыми параметрами, такими как:
 - коэффициент качества, влияющий на матрицу квантования;
 - выбор между цветовыми пространствами RGB и YCbCr.
4. Рассчитывать и отображать объективные метрики качества реконструированного изображения: пиковое отношение сигнал-шум PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) и индекс структурного сходства SSIM (Structural Similarity Index Measure).
5. Обеспечить сравнительный анализ исходного и сжатого изображений.

III. ТЕОРИЯ

A. Алгоритмическая основа

Основой системы является классический алгоритм JPEG [5]. Его этапы для серого изображения или отдельного канала цветного изображения могут быть описаны следующим образом.

1. Перевод в цветное пространство YCbCr: YCbCr – это цветное пространство, которое разделяет информацию на яркость (Y) и две цветоразностные компоненты (Cb и Cr). Оно широко используется в

системах обработки видео и сжатия изображений, так как позволяет эффективно уменьшать избыточность данных. Человеческий глаз менее чувствителен к изменениям цвета, чем к яркости, поэтому компоненты Cb и Cr часто подвергаются субдискретизации для экономии места без заметной потери качества [6].

2. Разбиение на блоки: изображение разделяется на блоки размером 8×8 пикселей.

3. Дискретное косинусное преобразование (ДКП): для каждого блока вычисляется ДКП, которое переводит сигнал из пространственной области в частотную и вычисляется по формуле:

$$F(u, v) = \frac{1}{4} C(u)C(v) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \times \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{16} \right] \times \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{16} \right], \quad (1)$$

где $f(x, y)$ – значение яркости (или цвета) пикселя в позиции (x, y) внутри блока 8×8. Перед применением ДКП значения пикселей сдвигаются из диапазона $[0, 255]$ в $[-128, 127]$.

$F(u, v)$ – результирующий коэффициент ДКП в частотной области на позиции (u, v) . Это коэффициенты, которые затем подвергаются квантованию и сжатию.

x и y – координаты в пространственной области (координаты пикселя), $0 \leq x, y \leq 7$.

u и v – координаты в частотной области (координаты коэффициента), $0 \leq u, v \leq 7$.

Квантование:

Коэффициенты ДКП делятся на элементы матрицы квантования и округляются до целых чисел:

$$F_q(u, v) = \text{round} \left(\frac{F(u, v)}{Q(u, v)} \right), \quad (2)$$

где $F(u, v)$ – коэффициент ДКП на позиции (u, v) ; $Q(u, v)$ – значение из таблицы квантования на позиции (u, v) .

Матрица квантования является основным инструментом управления степенью сжатия и потерями.

Энтропийное кодирование:

Квантованные коэффициенты кодируются с использованием методов RLE и Хаффмана для получения итогового сжатого битового потока [7].

В. Метрики качества

Для количественной оценки искажений используются две метрики $PSNR$ (дБ) и $SSIM$ [8, 9]. $PSNR$ даёт соотношение между максимально возможной мощностью сигнала и мощностью шума (ошибки), внесенной сжатием:

$$PSNR = 10 \times \lg \left(\frac{MAX_i^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

где MAX – максимально возможное значение пикселя (например, 255), MSE – среднеквадратическая ошибка между исходным и сжатым изображениями.

$SSIM$ – это метрика оценки качества изображений, которая лучше соответствует человеческому восприятию, чем PSNR.

$SSIM$ анализирует три аспекта:

- Яркость (Luminance) – сравнение средней яркости
- Контраст (Contrast) – сравнение дисперсии (контрастности)
- Структуру (Structure) – сравнение паттернов и текстур

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (4)$$

где μ_x – среднее значение пикселей изображения x (оценка яркости), C_1 – константа для стабилизации (чтобы избежать деления на ноль). $C_2 = (k^2 L)^2$, k^2 обычно равно 0,03, σ_x – стандартное отклонение пикселей изображения x (оценка контраста).

IV. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Пользовательский интерфейс разделен на две основные колонки (Рис. 1). В левой части отображается оригинал изображения с метаданными (размер, формат), в правой – результат сжатия. Загрузка осуществляется через боковую панель.

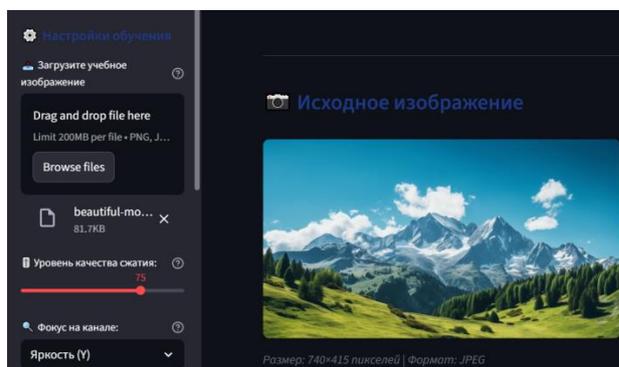


Рис. 1. Главное меню

После загрузки RGB-изображения программа автоматически преобразует его в цветовое пространство YCbCr. Программа визуально демонстрирует, как выглядит каждый канал в отдельности (Рис. 2).

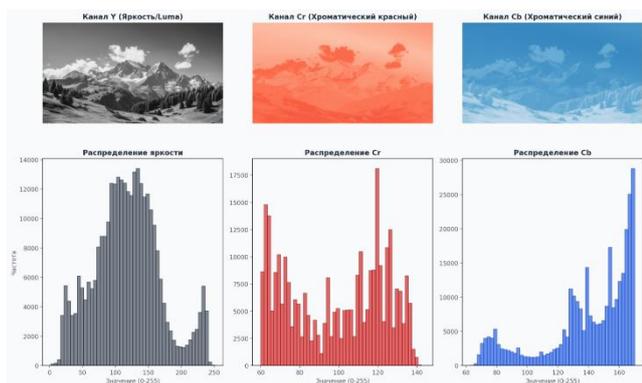


Рис. 2. Разделение на каналы

Для каналов Cb и Cr применяется понижающая дискретизация 4:2:0 (Рис. 3).

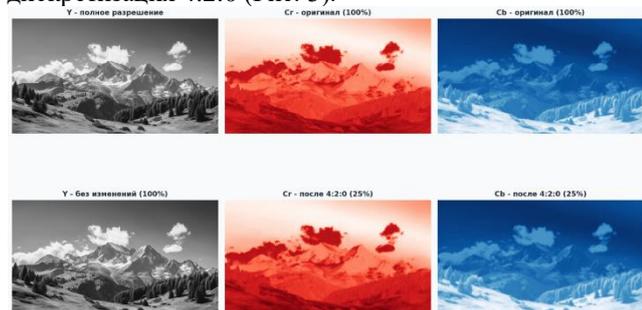


Рис. 3. Понижающая дискретизация

Размер каналов цветности уменьшается в два раза по горизонтали и вертикали. На каждый блок 2×2 пикселя приходится одно значение Cb и Cr. Канал Y остается без изменений.

Этот этап дает первое значительное сокращение данных (примерно 50 %) без заметной потери качества.

Каждый канал разбивается на непересекающиеся блоки размером 8×8 пикселей (Рис. 4).

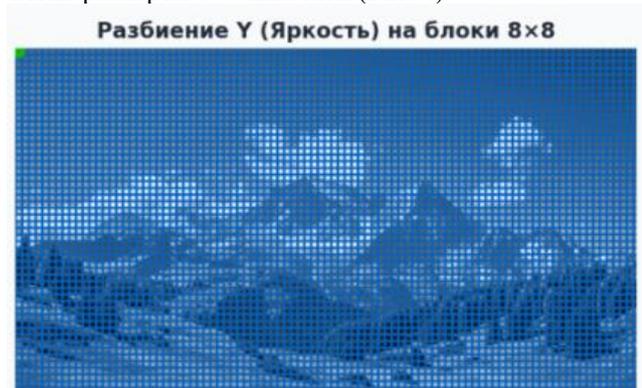


Рис. 4. Разбиение на блоки

Для изображения 512×512 пикселей получается $64 \times 64 = 4096$ блоков в канале Y.

В каналах Cb и Cr после прореживания – $32 \times 32 = 1024$ блока каждого.

Программа позволяет выбрать любой блок для детального изучения и показывает его числовые значения.

К каждому блоку 8×8 применяется ДКП (Рис. 5). ДКП преобразует сигнал из пространственной области в частотную. Вместо хранения значений пикселей хранятся коэффициенты косинусных волн разной частоты.

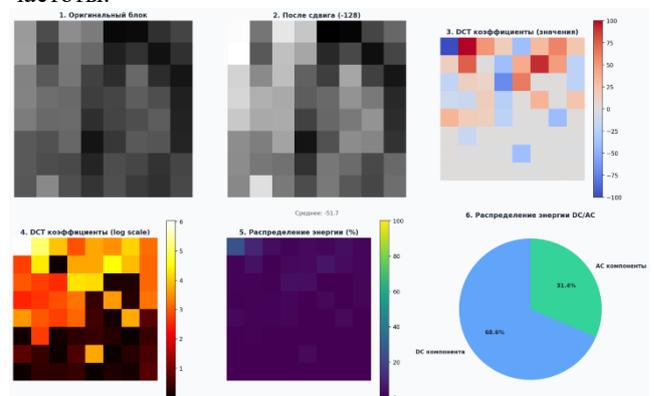


Рис. 5. ДКП для одного блока

Можно выделить высокие частоты, к которым человек менее восприимчив и удалить их без особого ущерба для качества изображения с помощью умножения на матрицу квантования (Рис. 6).

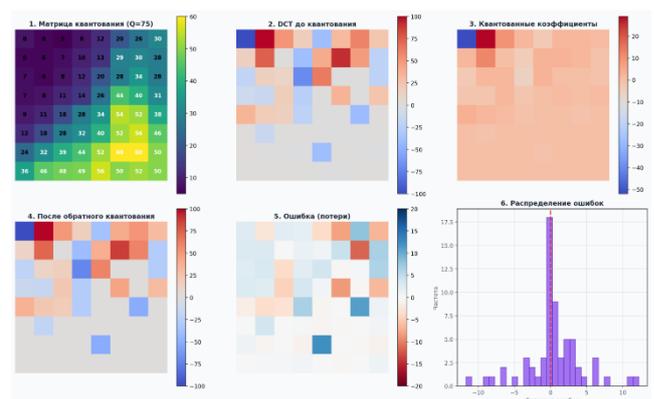


Рис. 6. Применение матрицы квантования

После квантования матрица коэффициентов ДКП содержит множество нулей, особенно в области высоких частот. Чтобы эффективно упаковать эти данные, применяется цепочка алгоритмов без потерь.

1. Зигзаг-сканирование переупорядочивает коэффициенты в одномерный вектор, концентрируя нули в его конце.

2. Кодирование длин серий (RLE) заменяет цепочки нулей компактными кодами вида (число_нулей, следующее_значение).

3. Кодирование Хаффмана – это финальный этап, на котором полученные символы (пары RLE и разницы DC) заменяются на двоичные коды переменной длины. Частые символы кодируются короткими битовыми последовательностями, редкие – длинными. Именно это и обеспечивает финальное сжатие потока данных.

Таким образом, этап энтропийного кодирования «упаковывает» уже отфильтрованную и

упорядоченную информацию, удаляя избыточность без изменения самих числовых значений.

В конце можно просмотреть метрики получившегося сжатого изображения (Рис. 7).

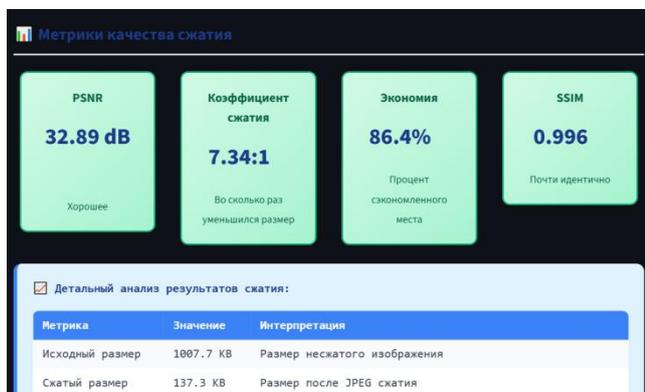


Рис. 7. Метрики качества

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Влияние коэффициента качества

Было проведено сжатие изображения размером 2200 Кбайт с коэффициентами качества 10 %, 50 % и 90 %. Результаты представлены в Табл. I.

ТАБЛИЦА I

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КАЧЕСТВА НА ПАРАМЕТРЫ СЖАТИЯ

Коэффициент качества	Размер файла, Кбайт	PSNR, дБ	SSIM
10 %	46,7	27,5	0,81
50 %	154,3	33,1	0,95
90 %	356,3	36,92	0,99

Таблица показывает ожидаемую зависимость: с ростом качества увеличивается размер файла. Параметр SSIM показывает наибольшее визуальное сходство с оригиналом при наибольшем коэффициенте качества.

На Рис. 8 представлено исходное изображение.



Рис. 8. Исходное изображение

При сжатии до 90 % качества (Рис. 9) отсутствуют заметные визуальные изменения, что подтверждает SSIM, но размер изображения уменьшился в шесть раз.



Рис. 9. Качество сжатия 90 %

При сжатии до 50 % (Рис. 10) визуальное качество также остается на хорошем уровне, а размер изображения уменьшается в 14 раз.



Рис. 10. Качество сжатия 50%

При сжатии до 10 % (Рис.11) можно заметить типичные артефакты сжатия алгоритма JPEG:

- Блочная пикселизация – на картинке становятся заметны мелкие или крупные квадратные блоки, залитые различными оттенками или градиентами. Они появляются, когда в силу экстремального сжатия пиксели похожих цветов «склеиваются» друг с другом.
- Шумовые ореолы вокруг краёв возникают из-за попыток сжать резкие контрасты, что приводит к размытию или эффекту «кольца».
- Отдельные полосы цвета в областях, которые должны иметь плавный градиент появляются, когда количество цветов в градиенте слишком уменьшено, что приводит к заметным переходам [10].



Рис. 11. Качество сжатия 10 %

VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная система наглядно демонстрирует фундаментальный компромисс при сжатии с потерями: невозможно одновременно достичь максимальной степени сжатия и высочайшего визуального качества. Эксперименты показывают, что даже при относительно высоких значениях PSNR (свыше 35 дБ) визуальный анализ может выявить специфические артефакты, такие как «блокинг» и «размытие» контуров, что подчеркивает ограниченность любой единственной метрики и важность субъективной оценки.

VII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и реализована интеллектуальная интерактивная система для обучения основам сжатия изображений с управляемыми потерями.

2. Система предоставляет инструменты для экспериментирования с ключевыми параметрами алгоритма JPEG и визуализирует как промежуточные этапы обработки, так и итоговый результат.

3. Интеграция объективных метрик качества (PSNR, SSIM) и средств визуального сравнения позволяет проводить всесторонний анализ эффективности сжатия.

Перспективы развития системы включают внедрение поддержки современных форматов, таких как WebP и HEIF, а также добавление модулей, объясняющих основы сжатия без потерь.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wallace G.K. The JPEG still picture compression standard // Communications of the ACM. – 1991. – Vol. 34. – № 4. – P. 30–44.
- [2] Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
- [3] Иванов Д.В., Кузнецова О.П. Мультимедийные технологии в образовании: учеб. пособ. – СПб.: Лань, 2019. – 320 с.
- [4] Ahmed N., Natarajan T., Rao K.R. Discrete Cosine Transform // IEEE Transactions on Computers. – 1974. – Vol. C-23. – № 1. – P. 90–93.
- [5] Козлов С.А., Чернявский А.В. Методы сжатия изображений: учебное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 256 с.

- [6] В.В. Старовойтов, Д.С. Шпилев. Цифровая обработка сигналов и изображений. – Минск: БГУИР, 2015. – 367 с.
- [7] Иванов Д.В. Основы мультимедийных технологий: сжатие данных. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 320 с.
- [8] Прокопов А.Н., Федотов М.А. Алгоритмы и методы сжатия изображений. – Новосибирск: НГТУ, 2020. – 180 с.
- [9] Kwon M.J., Nam S.H., Yu I.J. et al. Learning JPEG Compression Artifacts for Image Manipulation Detection and Localization // International Journal of Computer Vision, 2022, v. 130, pp. 1875–1895, doi: 10.1007/s11263-022-01617-5.
- [10] Сэйдж К., Мерсер М. JPEG: всё о формате сжатия изображений / пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 144 с.

Информация об авторах

Кочергин Сергей Николаевич – бакалавр направления “Информатика и вычислительная техника” Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, sergey.cochergin2016@gmail.com

Мамлеева Аделя Рифкатовна, старший преподаватель кафедры АСОИУ, Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, amamleeva@ilabsltd.com

System for Teaching Lossy Image Compression

S. N. Kochergin, A. R. Mamleeva

Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

Abstract – The paper presents an intelligent system for teaching of lossy image compression methods. The relevance of the research is driven by the growing volume of visual data and the need for its efficient storage and transmission. The designed system is an interactive web application visualizes the principles of compression algorithms, such as JPEG, and allows experiments with key parameters as "compression ratio – image quality". The system implements modules for the quantization parameter adjusting, selecting color space, and assessing distortion metrics (PSNR, SSIM). Experiments demonstrate that interactive learning supported the proposed system leads to a deeper understanding of the compromises inherent in lossy compression compared to traditional lecture-based methods. The system is intended for students studying computer graphics, image processing, and multimedia technologies.

Keywords – image compression, lossy compression, JPEG, learning, intelligent system, PSNR, SSIM.

References

- [1] Wallace G.K. The JPEG still picture compression standard // Communications of the ACM. – 1991. – Vol. 34. – № 4. – P. 30–44.
- [2] Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. Moscow, Tekhnosfera, 2012. – 1104 p.
- [3] Ivanov D.V., Kuznetsova O.P. Multimedia Technologies in Education: textbook. – Saint-Petersburg, Lan', 2019. – 320 p.
- [4] Ahmed N., Natarajan T., Rao K.R. Discrete Cosine Transform // IEEE Transactions on Computers. – 1974. – Vol. C-23. – № 1. – P. 90–93.

- [5] Kozlov S.A., Chernyavsky A.V. Image Compression Methods: Textbook. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2018.
- [6] Starovoitov V.V., Shpilev D.S. Digital Signal and Image Processing. Minsk, BGUIR, 2015.
- [7] Ivanov D.V. Fundamentals of Multimedia Technologies: Data Compression. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2017.
- [8] Prokopov A.N., Fedotov M.A. Algorithms and Methods of Image Compression. Novosibirsk, NSTU, 2020.
- [9] Kwon M.J., Nam S.H., Yu I.J. et al. Learning JPEG Compression Artifacts for Image Manipulation Detection and Localization // International Journal of Computer Vision, 2022, v. 130, pp. 1875–1895, doi: 10.1007/s11263-022-01617-5.
- [10] Sage K., Mercer M. JPEG: All about the Image Compression Format, Moscow, DMK Press, 2019.

Information about the authors

Sergey N. Kochergin, bachelor of Science in Computer Science and Engineering, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, sergey.kochergin2016@gmail.com

Adelya R Mamleeva, senior lecturer of the AIPCS Department, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, amamleeva@ilabsltd.com

Разработка кроссплатформенной учебной среды для обучения программированию школьников и студентов

А.А. Плеханов, Р.В. Кусмамбетов, В.В. Лаптев

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – Обучение программированию сегодня – это не просто изучение синтаксиса языка, это в первую очередь формирование алгоритмического мышления. Современные профессиональные инструменты слишком сложны. Синтаксис английского языка создает лингвистический барьер, а доступность готовых решений в интернете провоцирует к простому бездумному копированию кода. Кроме того, в условиях перехода образовательных учреждений на отечественное программное обеспечение остро встает вопрос кроссплатформенности учебных сред. В этой статье рассматривается опыт внедрения и планируемой модификации специализированной учебной среды программирования **Semantic IDE**, разработанной в Астраханском государственном техническом университете. Рассказано о ключевых принципах, заложенных в основу среды, приведён анализ существующих аналогов и описаны основные технические аспекты реализации.

Ключевые слова – учебная среда программирования, кроссплатформенность, **Semantic IDE**, русскоязычный синтаксис, транслятор кода.

I. ВВЕДЕНИЕ

Информационные технологии не стоят на месте, каждый год появляются новые инструменты для разработки программного обеспечения. В то же время такие инструменты становятся сложными, их функционал становится перегруженным, как и языки программирования. Как следствие, обучение становится сложнее, и, согласно исследованию компании “Яков и Партнёры”, только половина студентов ИТ-специальностей становятся выпускниками [1].

II. ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО НАЧАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЮ

Погружение в программирование для начинающего обучающегося сопряжено с рядом проблем. Первая и самая очевидная – это дефицит квалифицированных преподавателей информатики [2], которые могут на достаточном уровне обучить основным базовым

концепциям программирования (ветвление, циклы, функции и т.п.), не говоря уже про сложные языки такие как C++, Java и Go.

Второй проблемой является языковой барьер. Для продуктивной работы с большинством современных языков программирования и, что важно, с сообщениями об ошибках в средах разработки, необходимо владеть английским на среднем уровне. Школьнику приходится одновременно учиться думать как программист и запоминать десятки иностранных ключевых слов. Это создает избыточную когнитивную нагрузку и отвлекает от главного – понимания логики построения алгоритма. Преподаватели Пензенского государственного университета отмечают, что обучение на родном языке делает программирование доступнее для тех, кто не владеет английским языком [3].

Третья проблема – это такие среды разработки, как Visual Studio Code или IDE от JetBrains – мощные IDE для опытных разработчиков. Для новичка же их интерфейс представляет собой лабиринт из кнопок, меню и настроек, в которых начинающему легко запутаться. Идеальная учебная среда должна быть простой, интуитивной и направленной на решение конкретных учебных задач, а не на поддержку всевозможных технологий.

Четвёртая проблема связана с популярными учебными языками, такими как Python или JavaScript [4]. Будучи нетипизированными, они прощают многие ошибки на этапе написания, но могут выдать неочевидные сбои при выполнении из-за несоответствия типов данных. Это формирует небрежное отношение к структуре данных. При последующем переходе на строго типизированные языки (C++, Java) студенты сталкиваются с резким скачком сложности, так как фундамент для понимания типов не был заложен [5].

Пятой, но не менее важной проблемой является доступность готовых решений. Если выданное задание требует выполнения на Python, то ученик с высокой вероятностью найдет его готовое решение в интернете. Отсюда обучение сводится к бездумному поиску и копированию, а не к самостоятельному размышлению и поиску ошибок. В этой ситуации требуется

уникальная среда, код для которой нельзя просто скопировать из сети, заставляя студента “включать” голову.

Именно совокупность этих проблем и определяет требования к современной учебной среде программирования, которую не удаётся в полной мере удовлетворить существующими массовыми продуктами.

III. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ УЧЕБНЫХ СРЕД

Чтобы понять, какие инструменты уже есть на рынке и в чём заключаются их недостатки, мы провели сравнительный анализ нескольких популярных сред, используемых в образовании: Semantic IDE, КуМира, ПиктоМира и Scratch. Сравнение проводилось по ключевым для нашей задачи критериям: способность работать на разных операционных системах (кроссплатформенность), невозможность копирования кода, отсутствие решений в открытом доступе, наличие встроенных обучающих материалов и возможность показать код учебного языка на другом промышленном языке. Результаты анализа показали, что полностью подходящего решения нет (см. Табл. I).

ТАБЛИЦА I.
АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

Критерий	Semantic IDE	КуМир	ПиктоМир	Scratch
Кроссплатформенность	-	+	+	+
Запрет на копирование кода	+	-	-	-
Отсутствие готовых решений в интернете	+	-	+	-
Есть обучение программированию	+	+	+	+
Перевод кода с учебного языка в промышленные языки программирования	+	-	-	-

Например, Scratch, КуМир и ПиктоМир работают на разных платформах, но в них легко скопировать код и, ключевой момент, у них отсутствует “Перевод кода с учебного языка в промышленные язык программирования”. А также для КуМир и Scratch можно найти готовые проекты и код на просторах Интернета. Среда Semantic IDE, разработанная в АГТУ (эксплуатируется с 2012 года), является самой подходящей разработкой. В ней нельзя скопировать код, нет готовых решений в сети для её уникального языка Slang, присутствует основная теория по темам, и в первой версии Semantic уже присутствовал перевод в другой язык программирования (Python, C, Pascal, Basic) [6]. Однако её главным недостатком стала привязка к операционной системе Windows. Во время

активного импортозамещения и перехода школ и вузов на отечественные ОС на базе Linux (такие как «Альт» или «РОСА») [7] среда, которая не поддерживает эти платформы, теряет значимость. Этот анализ показал, что необходим не поиск нового инструмента, а глубокая модернизация существующего – Semantic IDE, с целью устранения его ключевого технического ограничения и добавления конвертора, который будет переводить код на современные востребованные языки программирования.

IV. КОНЦЕПЦИЯ SEMANTIC IDE V2

Концепция новой версии, Semantic IDE v2 строится на трех основных идеях, призванных устранить старые недостатки и добавить новые возможности.

Первая идея – переход на кроссплатформенную веб-технологическую основу. В качестве платформы выбран фреймворк Electron, который позволяет создавать десктопные приложения с использованием веб-технологий (JavaScript/TypeScript, HTML, CSS) [8]. Это решение устраняет проблему платформенной зависимости. Одно и то же приложение будет работать под Windows, macOS и, что критически важно, под любыми дистрибутивами Linux, включая все отечественные.

Второй идеей является создание целостного учебного курса внутри среды. Среда будет содержать структурированный теоретический материал по темам, сразу после изучения которого ученик перейдет к выполнению практических заданий в том же интерфейсе, используя тот же редактор. Затем последуют более сложные лабораторные работы. Это позволит сконцентрироваться на предмете, минимизировав посторонние переключения контекста и бесполезный поиск информации.

Третья идея – развитие и усиление функции трансляции кода. Это уникальная особенность, унаследованная от первой версии. Планируется поддержка преобразования кода из учебного Slang в пять современных промышленных языков: C++, Java, Python, JavaScript и Go. Цель такого преобразования – наглядная демонстрация кода: слева – оригинальный код на русском Slang, справа – его эквивалент на выбранном языке программирования. Это позволяет ученику увидеть, что логика и алгоритм, которые он построил, универсальны. Он понимает, что, выучив основы на родном языке, он уже фактически умеет программировать, и ему остается лишь освоить новый синтаксис. Это снимает страх перед языками программирования с иностранной лексикой и делает последующий переход осознанным и плавным.

V. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ: РОЛЬ АБСТРАКТНОГО СИНТАКСИЧЕСКОГО ДЕРЕВА

Для реализации описанных возможностей необходимо использовать абстрактное синтаксическое дерево.

Абстрактное синтаксическое дерево (англ. Abstract Syntax Tree (AST)) – это не просто техническая деталь, а сердцевина всей системы. Это древовидная модель, которая представляет структуру программы. Каждый элемент кода – оператор, переменная, вызов функции, – становится узлом в этом дереве с определенными связями. Ключевая особенность подхода в Semantic IDE состоит в том, что это дерево строится динамически, прямо во время набора кода пользователем (Рис. 1).

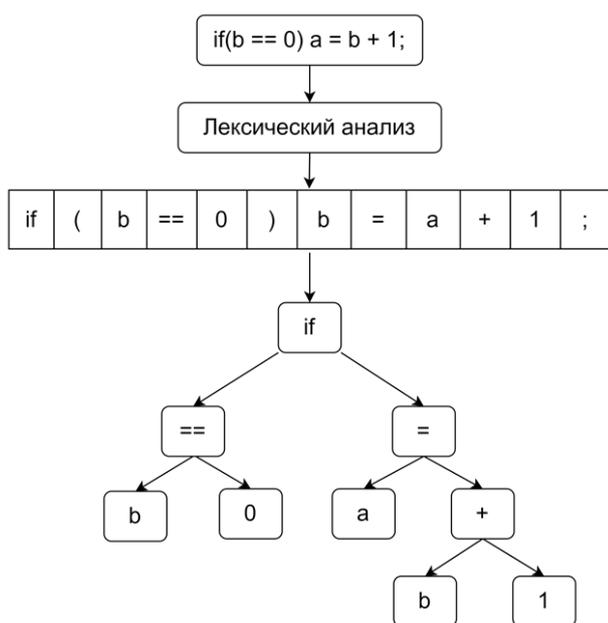


Рис. 1. Наглядное представление абстрактного синтаксического дерева

Это поможет решить несколько задач одновременно. Во-первых, на его основе работает мгновенная проверка кода: анализатор проходит по дереву и выявляет семантические ошибки (например, использование необъявленной переменной) ещё до попытки запуска.

Во-вторых, именно это дерево является объектом для манипуляций в семантическом редакторе. Когда студент добавляет блок «цикла» в коде, он фактически добавляет новый узел в AST. Представление кода на экране – это просто удобное для чтения отображение этого дерева.

В-третьих, AST служит идеальным промежуточным звеном для транслятора. Конвертору не нужно анализировать текстовый код Slang. Вместо этого он получает на вход уже готовое, проверенное и структурированное абстрактное синтаксическое дерево. Его задача сводится к обходу этого дерева и

генерации на его основе эквивалентного кода на целевом языке (C++, Python и т.д.). Такой подход делает систему трансляции надежной, предсказуемой и легко расширяемой для добавления новых целевых языков.

Можно провести аналогию с архитектурным паттерном «Модель-Представление-Контроллер» (MVC). В этой аналогии абстрактное синтаксическое дерево и есть Модель (Model) – центральная структура данных. Представление (View) – это интерфейс редактора, который отображает эту модель в виде текста (выбранного языка программирования). А Контроллер (Controller) – это все обработчики действий пользователя (ввод или изменение текста), которые изменяют AST, а те изменения, в свою очередь, автоматически обновляют View и запускают процессы проверки и трансляции.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка Semantic IDE v2 – это не создание проекта с нуля, а модернизация и развитие успешного отечественного образовательного продукта с более чем десятилетней историей.

Перенос среды на современную веб-технологическую платформу (Electron, TypeScript) гарантирует её жизнеспособность и доступность в любой образовательной организации, независимо от используемой операционной системы. А функция конвертации кода в пять промышленных языков построит прочный мост между учебной средой и реальным миром разработки, помогая студенту преодолеть синтаксический барьер и увидеть общность фундаментальных принципов программирования.

Таким образом, Semantic IDE v2 имеет все шансы стать современным, технологически актуальным и педагогически выверенным инструментом для массового обучения основам программирования и алгоритмического мышления в школах и учреждениях дополнительного образования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Выпускники по ИТ-специальностям: от количества к качеству [Электронный ресурс] // Яков и Партнёры. — URL: <https://yakovpartners.ru/publications/from-quantity-to-quality/> (дата обращения: 17.12.2025)
- [2] Сколько учителей не хватает в российских школах на самом деле. [Электронный ресурс] URL: <https://vk.cc/cSyccn> (дата обращения: 18.12.2025)
- [3] Кодить по-русски: студентов научат программировать на кириллице [Электронный ресурс] // Известия. — URL: <https://iz.ru/1980660/anton-belyi/kodit-po-russki-studentov-nauchat-programmirovat-na-kirillice> (дата обращения: 16.12.2025)
- [4] Федеральная рабочая программа | Информатика. 7–9 классы (базовый уровень) [Электронный ресурс] URL: <https://vk.cc/cDP1ur> (дата обращения: 19.12.2025).
- [5] Барышева И.В., Козлов О.А., Малкина Е.В., Шестакова Н.В. Проблемы программирования в рамках школьного образования // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. – 2023. – № 3(71). – [Электронный

ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problem-programmirovaniya-v-ramkah-shkolnogo-obrazovaniya> (дата обращения: 19.12.2025).

- [6] Лаптев В.В., Грачев Д.А. Интегрированная среда для обучения программированию // Объектные системы – 2013: материалы VII Международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 10-12 мая 2013 г.) / Под общ. ред. П.П. Олейника. – Ростов-на-Дону: ШИ (Ф) ЮРГТУ (НПИ), 2013. – с. 17-24.
- [7] Топ-10 российских операционных систем 2025: перспективы и особенности [Электронный ресурс] // ABC-Labs. — URL: <https://www.abc-labs.ru/blog/top-10-rossiyskikh-operatsionnykh-sistem-2025-perspektivy-i-osobennosti/> (дата обращения: 16.12.2025)
- [8] Янг А., Мек Б., Кантелон М. Node.js в действии. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2018. – с. 339–359.

Информация об авторах

Плеханов Алексей Алексеевич, бакалавр направления «Информатика и вычислительная техника» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия.

Кусмамбетов Рамиль Викторович, бакалавр направления «Информатика и вычислительная техника» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, finn_nite_m@mail.ru

Лаптев Валерий Викторович, к.т.н., доцент кафедры "Автоматизированные системы обработки информации и управления" Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, WLaptew@yandex.ru

Development of a cross-platform learning environment for teaching programming to schoolchildren and students

A.A. Plekhanov, R.V. Kusmambetov, V.V. Laptev
Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – Today learning to program is not just learning the syntax of a language, it is primarily the formation of an image of algorithmic thinking. Modern professional tools are too complex. The English syntax of languages creates a linguistic barrier, and the availability of ready-made solutions on the Internet provokes simple mindless copying of code. In addition, in the context of the transition of educational institutions to domestic software, the issue of cross-platform learning environments is becoming acute. This article examines the experience of implementing and planned modification of the specialized Semantic IDE programming environment developed at Astrakhan State Technical University. It describes the key principles underlying the environment, provides an analysis of existing analogues, and describes the main technical aspects of implementation.

Keywords – educational programming environment, cross-platform, Semantic IDE, Russian syntax, code translator.

References

- [1] Graduates in IT specialties: from quantity to quality [Electronic resource]. – URL: <https://yakovpartners.ru/publications/from-quantity-to-quality>. (date of access: 17.12.2025)
- [2] How many teachers are actually missing in Russian schools. [Electronic resource] URL: <https://vk.cc/cSyccn> (date of access: 18.12.2025)
- [3] Coding in Russian: students will be taught how to program in Cyrillic. [Electronic resource] – URL: <https://iz.ru/1980660/anton-belyi/kodit-po-russki-studentov-nauchat-programmirovat-na-kirillice> (date of access: 16.12.2025)
- [4] Federal Work Program | Computer Science. Grades 7-9 (basic level) [Electronic resource] URL: <https://vk.cc/cDP1up> (date of access: 19.12.2025).
- [5] Barysheva I.V., Kozlov O.A., Malkina E.V., Shestakova N.V. Problems of programming in school education // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. Series: Social Sciences. – 2023. – No. 3 (71). – [Electronic resource] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problem-programmirovaniya-v-ramkah-shkolnogo-obrazovaniya> (date of access: 19.12.2025).
- [6] Laptev V.V., Grachev D.A. Integrated environment for teaching programming. // Object systems – 2013: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference (Rostov-on-Don, May 10-12, 2013) / Ed. P.P. Oleinik. – Rostov-on-Don: SRSPU (NPI), 2013. – pp. 17-24.
- [7] Top 10 Russian operating systems in 2025: Prospects and features [Electronic resource] // ABC-Labs. – URL: <https://www.abc-labs.ru/blog/top-10-rossiyskikh-operatsionnykh-sistem-2025-perspektivy-i-osobennosti/> (date of access: 16.12.2025)
- [8] Young, A., McHale, B., Cantelon, M.. Node.js in action. – 2nd ed. – St. Petersburg.: Piter, 2018. – Pp. 339–359.

Information about the authors

Alexey A. Plekhanov, bachelor of Science in Computer Science and Engineering, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia.

Ramil V. Kusmambetov, bachelor of Science in Computer Science and Engineering, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, finn_nite_m@mail.ru.

Valery V. Laptev, cand. of tech, sci., asst. prof., Automation Systems of Information Processing and Control Dept., Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, WLaptew@yandex.ru.

Анализ успеваемости и освоения компетенций студентами Астраханского государственного технического университета

С.Г. Горст, Т.В. Хоменко

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – В статье рассматривается подход к оценке уровня освоения профессиональных компетенций студентами на основе их учебной активности и результатов. Особое внимание уделяется ключевым параметрам, влияющим на успешность обучения: посещаемости занятий, оценкам, а также своевременности выполнения учебных заданий. Предложена модель, позволяющая учитывать вклад каждой дисциплины в формирование той или иной компетенции. Также обсуждаются возможности автоматизированного анализа и применения методов машинного обучения для объективной оценки прогресса студентов. Работа подчеркивает значимость комплексного подхода к мониторингу успеваемости и выделяет перспективы его использования для совершенствования образовательного процесса.

Ключевые слова – успеваемость студентов, образовательная аналитика, компетенции, оценка знаний, дисциплины, посещаемость, машинное обучение, анализ данных, контроль прогресса, управление обучением.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное образование невозможно представить без активного использования информационных технологий. Сегодня практически все общеобразовательные учреждения, а также значительная часть вузов, применяют специализированное программное обеспечение, позволяющее студентам и школьникам отслеживать свои академические успехи, получать оценки и выполнять задания в онлайн-формате. Такие сервисы стали привычными и востребованными среди студентов, что формирует ожидание аналогичного цифрового опыта и в системе высшего образования.

Тем не менее, высшее образование имеет свои особенности. Процессы оценивания и учета академических результатов существенно различаются в зависимости от вуза, направления подготовки и даже индивидуального подхода преподавателей. Это делает задачу создания универсального цифрового инструмента для управления образовательными

данными крайне сложной и актуальной для многих учреждений.

Настоящее исследование направлено на анализ системы, обеспечивающей контроль и оценку успеваемости студентов, с акцентом на определение уровня освоения конкретных компетенций.

Новизна данной работы заключается в разработке экспертной модели, которая объединяет академические показатели и данные об освоении компетенций, позволяя анализировать качество обучения не только по оценкам и рейтинговым баллам и посещаемости, но и по уровню сформированности навыков.

Главная цель исследования – разработка и последующая апробация модели, позволяющей оценивать эффективность освоения компетенций студентами. Основной задачей является построение математической модели, учитывающей взаимосвязь между учебными дисциплинами и соответствующими им компетенциями, степень овладения компетенциями студентом, а также значимость каждой дисциплины в процессе их формирования. Такая модель может служить инструментом для оптимизации образовательных траекторий, повышения качества подготовки и улучшения академической поддержки обучающихся.

Задача исследования сводится к формализации процесса оценки степени освоения компетенций, выявленного ранее [1].

В рамках подготовки исследования был также осуществлён обзор существующих информационных систем, предназначенных для мониторинга учебной деятельности. Среди рассмотренных решений – платформа «Дневник.ру» [2] и система «Успеваемость МГУ» [3]. Оба решения предоставляют функциональность для просмотра текущих оценок студентов и школьников.

Однако проведённый анализ выявил ряд существенных ограничений существующих решений:

- отсутствие функциональности, адаптированной под специфику анализа успеваемости студентов АГТУ;
- ограниченность инструментов анализа академической успешности;

- ориентированность исключительно на оценки как основной показатель;
- игнорирование роли лабораторных работ в оценке прогресса;
- невозможность определения уровня освоения отдельных профессиональных компетенций.

Для построения системы анализа успеваемости студентов, учитывающей все необходимые академические параметры, необходимо их определить. С этой целью был проведён анализ факторов, способствующих повышению или снижению успеваемости обучающихся [4-6], а также возможных стратегий по её улучшению [7, 8], откуда был сделан вывод о существенном влиянии оценок, полученных студентами в процессе обучения.

Также в исследовании Скотта Фримена [9] установлено, что существует прямая зависимость между посещаемостью занятий и результатами обучения, что делает данный параметр важным для последующего анализа уровня освоения компетенций.

Таким образом, для формирования полноценной модели оценки академических достижений необходимо опираться на оценки, рейтинговые показатели и посещаемость студентов.

II. АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Каждая компетенция формируется через набор дисциплин, и вклад каждой из них в развитие компетенции может быть различным. Таким образом, дисциплины имеют разный уровень значимости (вес), который следует учитывать при расчётах.

Оценка степени освоения компетенции осуществляется путём анализа всех дисциплин, связанных с ней. Для каждой такой дисциплины учитывается, как часто студент посещал занятия, какую оценку он получил, а также были ли задержки в сдаче работ. Эти параметры объединяются в единую функцию, отражающую вклад конкретной дисциплины в развитие компетенции.

Особое внимание при этом уделяется весу каждой дисциплины, то есть тому, насколько значимо её содержание для формирования определённой компетенции. Неправильная оценка значимости может привести к искажённым результатам анализа. В связи с этим в рамках исследования предлагается подход, при котором веса дисциплин определяются не вручную, а автоматически с использованием технологий машинного обучения.

Для решения данной задачи предполагается применение нейронной сети. Такой подход позволит учитывать сложные взаимосвязи между результатами студентов и компетенциями, которые они осваивают. Реализация этой идеи включает в себя несколько этапов:

Сбор необходимых данных. На этом этапе формируется обучающая выборка, в которую входят

сведения о результатах студентов, посещаемости, сроках сдачи заданий и оценках по дисциплинам.

Обучение модели. В качестве модели предлагается использовать многослойный перцептрон, один из базовых видов нейронных сетей. Он будет обучаться на собранных данных с целью определения того, какие дисциплины и в какой степени влияют на успешное формирование каждой из компетенций.

Такой подход позволяет отказаться от субъективного экспертного определения весов дисциплин и вместо этого опираться на объективные данные. Это делает оценку степени освоения компетенций более точной и обоснованной, что в дальнейшем может использоваться для улучшения образовательных программ и поддержки студентов.

Необходимо определить, какие показатели влияют на степень освоения материала студентами. Данные о показателях представлены в Табл. I.

ТАБЛИЦА I
ПОКАЗАТЕЛИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОСВОЕНИЕ МАТЕРИАЛА

Метрика	Процент влияния
Посещаемость	Примерный процент влияния – 25% (может объяснять до четверти разницы в математических достижениях между группами) [10]
Оценка	Оценка в образовательном процессе имеет очень большое значение, так как сама суть оценки – показать, насколько хорошо освоен материал
Задержка в сдаче экзамена по дисциплине	Примерный процент влияния: 8-9% [11]

Исходя из влияния данных показателей, можно сделать вывод, что для оценки уровня освоения студентом определённой компетенции необходимо учитывать несколько параметров:

- посещаемость занятий;
- полученные рейтинговые баллы;
- своевременность сдачи учебных заданий.

Обозначим данные параметры. Пусть:

- C_i – компетенция i .
- D_j – дисциплина j , имеющая компетенцию C_i .
- S_k – студент k .

Параметры для вычисления степени освоения компетенции:

- A_{kj} – посещаемость студента S_k дисциплины D_j (значение от 0 до 1 – рассчитывается как отношение количества посещенных занятий к количеству проведенных занятий).

- G_{kj} – рейтинговые баллы студента S_k за дисциплину D_j (100-балльная шкала).

- L_{kj} – количество дней задержки в сдаче работы студента S_k по дисциплине D_j - $[0, +\infty)$.

Степень освоения компетенции определяется следующим образом:

$$O_{ki} = \sum_{j \in C_i} w_j \cdot f(A_{kj}, G_{kj}, L_{kj}), \quad (1)$$

где w_j – вес дисциплины для компетенции (для определения веса дисциплины будет использоваться нейросеть, обученная на определение того, имеет ли отношение дисциплина к компетенции, и если имеет, то насколько сильно); f – функция, результат которой показывает освоение дисциплины (в процентах):

$$f(A_{kj}, G_{kj}, L_{kj}) = A_{kj} \cdot G_{kj} \cdot delay, \quad (2)$$

где $delay = 0,92$, если $L_{kj} > 0$, иначе 1 (так как ранее было показано, что процент влияния задержки в сдаче экзамена по дисциплине равен 8-9%); O_{ki} – степень освоения компетенции (выраженная в процентах в диапазоне $[0, 100]$).

III. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ показателей, отражающих учебную активность студентов, таких как посещаемость, успеваемость и своевременность выполнения заданий, — позволяет сформировать целостное представление об уровне освоения ими профессиональных компетенций. Разнообразие учебных дисциплин и их вклад в развитие конкретных навыков создают основу для построения более точной и справедливой системы оценки. Внедрение подобной модели в образовательный процесс не только способствует объективному мониторингу академического прогресса, но и помогает выявить зоны, требующие дополнительного внимания со стороны преподавателей и студентов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горст С.Г. Анализ успеваемости и освоения компетенций студентами АГТУ // 75-я Международная студенческая научно-техническая конференция, 14-19 апреля 2025г., Астрахань: Изд-во АГТУ, 2025 – [Электронный ресурс]: <http://astu.org/Content/Page/5833> (дата обращения: 01.05.2025).
- [2] Электронный дневник "Дневник.ру" – [Электронный ресурс]: <https://dnevnik.ru/> (дата обращения: 01.05.2025).
- [3] Мониторинг академической успеваемости Московского государственного университета – [Электронный ресурс]: https://www.msu.ru/ru/edu_cadet_monitor (дата обращения 01.05.2025).
- [4] Факторы влияния на успеваемость студентов в ВУЗе – [Электронный ресурс]: <https://imes.su/press-tsentr/stati/item/1431-factory-vliyaniya-na-uspevaemost-studentov-v-vuze/> (дата обращения: 02.05.2025).
- [5] Factors Affecting Students Academic Performance – [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/367360842_Factors_Affecting_Students'_Academic_Performance_A_review (дата обращения: 02.05.2025).
- [6] Key factors influencing students academic performance – [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s43067-024-00166-w> (дата обращения 02.05.2025).
- [7] Методы повышения успеваемости студентов в университете – [Электронный ресурс]: <https://journal.tinkoff.ru/guide/better-grades/> (дата обращения: 02.05.2025).

- [8] Redefining learning: student-centered strategies for academic and personal growth – [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1518602> (дата обращения: 02.05.2025).
- [9] Scott Freeman – The role of active learning in the educational process – [Online]. Available: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1319030111> (дата обращения: 02.05.2025).
- [10] Joshua Goodman (NBER) – The impact of attendance – [Online]. Available: <https://www.nber.org/digest/nov14/student-absences-instructional-time-and-academic-achievement> (дата обращения: 01.05.2025).
- [11] Kim & Seo (meta-analysis, 2015) — Persistent negative association between academic procrastination and academic performance – [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.paid.2015.02.038> (дата обращения: 02.05.2025).

Информация об авторах

Горст Сергей Германович, магистрант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, gorstsergei@mail.ru

Хоменко Татьяна Владимировна, д.т.н., зав. кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, t_v_khomenko@mail.ru

Analysis of academic performance and development of competencies by ASTU students

S. G. Gorst, T. V. Khomenko

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – This article discusses an approach to assessing the level of mastery of professional competencies by students based on their learning activities and results. Special attention is paid to the key parameters that affect the success of learning: attendance, grades, as well as the timeliness of completing training assignments. A model is proposed that allows taking into account the contribution of each discipline to the formation of a particular competence. The possibilities of automated analysis and the use of machine learning methods for an objective assessment of student progress are also discussed.

The work highlights the importance of an integrated approach to monitoring academic performance and emphasizes the prospects for its use to improve the educational process.

Keywords – student performance, educational analytics, competencies, knowledge assessment, disciplines, attendance, machine learning, data analysis, progress monitoring, learning management.

References

- [1] Gorst S.G. Analysis of Academic Performance and Competence Acquisition by ASTU Students // 75th International Student Scientific and Technical Conference, April 14–19, 2025, Astrakhan: ASTU Publishing House, 2025–[Online]. Available at: <http://astu.org/Content/Page/5833> (дата обращения: 01.05.2025).
- [2] Electronic diary "dnevnik.ru" – [Online]. Available: <https://dnevnik.ru/> (дата обращения: 01.05.2025).

- [3] Monitoring the academic performance of Moscow State University – [Online]. Available: https://www.msun.ru/ru/edu_cadet_monitor (дата обращения: 01.05.2025).
- [4] Student academic performance in universities, influencing factors – [Online]. Available: <https://imes.su/press-tsentr/stati/item/1431-factory-vliyaniya-na-uspevaemost-studentov-v-vuze/> (дата обращения: 02.05.2025).
- [5] Factors Affecting Students Academic Performance – [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/367360842_Factors_Affecting_Students'_Academic_Performance_A_review (дата обращения: 02.05.2025).
- [6] Key factors influencing students academic performance – [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s43067-024-00166-w> (дата обращения: 02.05.2025).
- [7] Methods of improving student's academic performance at the university – [Online]. Available: <https://journal.tinkoff.ru/guide/better-grades/> (дата обращения: 02.05.2025).
- [8] Redefining learning: student-centered strategies for academic and personal growth – [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1518602> (дата обращения: 02.05.2025).
- [9] Scott Freeman – The role of active learning in the educational process – [Online]. Available: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1319030111> (дата обращения: 02.05.2025).
- [10] Joshua Goodman (NBER) – The impact of attendance – [Online]. Available: <https://www.nber.org/digest/nov14/student-absences-instructional-time-and-academic-achievement> (дата обращения: 01.05.2025).
- [11] Kim & Seo (meta-analysis, 2015) — Persistent negative association between academic procrastination and academic performance – [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.paid.2015.02.038> (дата обращения: 02.05.2025).

Information about the authors

Gorst Sergey Germanovich, Master's student of the Department of Automated Information Processing and Management Systems, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, gorstsergei@mail.ru

Tatyana Vladimirovna Khomenko, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automated Information Processing and Management Systems, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, t_v_khomenko@mail.ru

Стандарты сетей связи 5G/5G-Advanced для цифровой трансформации железных дорог и развития интеллектуальных транспортных систем

С.В. Мартынов, А.В. Осовский, Д.В. Кутузов

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – В статье рассмотрены вопросы перехода от существующей системы железнодорожной радиосвязи GSM-R к перспективной системе FRMCS на базе технологий LTE/5G как необходимого условия для реализации высоких уровней автоматизации движения поездов (GoA3/GoA4). Проанализированы работы по стандартизации требований к системе и оборудованию FRMCS в рамках Международного союза железных дорог (UIC), консорциума 3GPP и Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI. Представлен обзор эволюции стандарта GSM-R, показаны его архитектурные ограничения в контексте требований перспективных сервисов управления движением и автономного вождения. Проведена сравнительная характеристика GSM-R, LTE-R, 5G и 5G-Advanced применительно к задачам высокоскоростных железных дорог. Показана прямая зависимость между уровнем автоматизации (GoA) и требованиями к характеристикам канала связи «поезд–земля».

Ключевые слова – высокоскоростные железные дороги, 5G-Advanced, FRMCS, GoA3/GoA4, GSM-R.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитию крупных агломераций в условиях сырьевой экономики способствуют не автобаны, а высокоскоростные железные дороги (ВСЖД). В настоящее время ВСЖД конкурирует с авиаперевозчиками за пассажиров. Между большинством российских крупных городов расстояния составляют от 300 до 800 километров. На таких расстояниях авиация не даёт большого преимущества в скорости, поскольку самолет летит недолго (от 0,5 до 1,5 ч), но существенное время затрачивается пассажирами, чтобы зарегистрироваться на рейс и добраться до аэропорта (в среднем 1,5 ч). Кроме того, пассажирам необходимо время, чтобы снова добраться до центра города. В целом, это занимает не меньше четырёх часов. Автобан позволяет проехать со скоростью 150 км/ч, пока пассажир не въехал в пригород, а при приближении к центру скорость резко падает из-за городского и пригородного

транспорта. В результате 300 километров от центра одного города до центра другого пассажир меньше чем за четыре часа не преодолеет, не говоря уже о расстояниях 800 км: там шесть-семь часов в лучшем случае. А с ВСЖД на таких расстояниях при скоростях поездов 350–400 км/ч между всеми агломерациями можно обеспечить расстояние двухчасовой доступности. Крупные города сливаются в единую рыночную систему, и люди спокойно в течение дня могут перемещаться туда-обратно, обеспечивая так называемую маятниковую миграцию. Таким образом, ВСЖД обеспечивают синергетический эффект в экономике за счёт резкого всплеска деловой активности между агломерациями. Обеспечение пассажиров ВСЖД бесперебойной связью и высокоскоростным интернетом на всём пути следования является не просто дополнительным сервисом по развлечению пассажиров информационным контентом в дороге, что тоже немаловажно для комфортной поездки, но и возможностью продолжать экономическую деятельность во время перемещения между агломерациями.

Связь «поезд–земля» является важным направлением в исследованиях вокруг ВСЖД из-за высокой скорости и возникающих из-за этого сложностей для беспроводных систем связи. Традиционные методы связи не могли поддерживать развертывание высокоскоростных железных дорог. Европейская система управления поездами (European Train Control System, ETCS) была первой, кто подробно изучил эту проблему, и попыталась её решить, имея стандартный цифровой метод связи для всех поездов в Европе. В то время в Европе существовало 14 различных аналоговых систем связи «поезд–земля», и впоследствии все они были заменены ETCS и GSM-R.

GSM-R (Global System for Mobile Communications, Railway) – это наиболее широко используемая железнодорожная система связи во всем мире, которая используется уже несколько десятилетий и до сих пор работает во многих железнодорожных системах.

Стандарт GSM-R был создан как расширение GSM с упором на железнодорожную сеть и для предоставления стандартизированного протокола цифровой связи, который будет совместим и экономически эффективен. Необходимо было заменить аналоговые системы, традиционно используемые в железнодорожной среде, на современные беспроводные полностью цифровые системы. Но сеть должна была соответствовать некоторым основным требованиям к железнодорожной связи, таким как связь, управляемая контроллером, автоматическое управление поездом, возможности маневрирования и телеметрии, аварийное дистанционное вещание, локальная связь, пассажирские услуги, адресация в зависимости от местоположения. Это позволяет сети отдавать приоритет данным уровня управления над данными уровня пользователя. Это узкополосная технология, определённая для работы в диапазоне 800–900 МГц [1]. Система позволяет сети лучше осуществлять передачу в макросотах, имея базовые станции, расположенные на расстоянии примерно 6–10 км друг от друга. Она поддерживает максимальную скорость 500 км/ч и обеспечивает покрытие в разных странах благодаря своему стандартизированному диапазону частот. Пиковая скорость передачи данных GSM-R по восходящей/нисходящей линии связи (UL/DL) составляет 172 Кбит/с. Типичные железнодорожные услуги, предлагаемые GSM-R, включают Voice Group Call Service (VGCS) и позволяют пользователям общаться с группой абонентов одновременно; Enhanced Multi-Level Precedence and Preemption (eMLPP) позволяют назначать различные уровни приоритета вызовам и абонентам для обеспечения непрерывности связи в условиях перегрузки сети, функциональную адресацию и адресацию, зависящую от местоположения [2]. В целом, большинство из вышеперечисленных услуг не требуют скорости передачи данных на уровне Мбит/с. Долгое время этого было достаточно: железнодорожная связь выполняла роль выделенного «канала управления» и не рассматривалась как универсальная цифровая инфраструктура.

Поезд считается высокоскоростным, если он способен развивать скорость более 200 км/ч. На этой скорости сложно поддерживать стабильную сеть связи между базовой станцией (BS) и поездом из-за эффектов распространения и канала, передачи сот и т.д. В ближайшем будущем в высокоскоростных железнодорожных системах появятся такие возможности, как разработка полностью автоматизированной работы поездов, мониторинг в реальном времени, высокоточная информация о пассажирах и прогнозное планирование технического обслуживания. Все это услуги в интеллектуальных железнодорожных системах, целью которых является не только улучшение мобильности, безопасности и надежности работы, но и улучшение качества

обслуживания, экологичности, комфорта и экономической эффективности. Для «умного» железнодорожного транспорта необходимо более широкое покрытие датчиками, поезд, грузы и пассажиры должны быть более взаимосвязаны, а операторам нужны более интеллектуальные методы работы с данными датчиков. Всё это требует наличия специальной системы беспроводной связи, которая может поддерживать большое количество датчиков, обеспечивать задержку на уровне миллисекунд, сверхнадёжность или скорость передачи данных до 1 Гбит/с при скорости поезда более 450 км/ч. Цифровая трансформация железных дорог расширила перечень задач: беспилотные режимы (GoA3/4), высокоплотное движение, видеоаналитика, телеметрия и диагностика, IoT датчики, высокоточное позиционирование и развитие ETCS до Уровня 3 (Level 3) [3].

Ограничения GSMR в этом контексте носят не эксплуатационный, а архитектурный характер. Теоретический максимум скорости передачи данных в GSMR оценивается как 172 кбит/с, а в реальных условиях пакетный трафик ограничивается от единиц до десятков кбит/с, при этом задержка может достигать 400–500 мс [4]. Такие значения плохо совместимы с требованиями критических сервисов, для которых в документах 3GPP (Техническая спецификация TS 22.289) фигурируют целевые классы задержки меньше или равной 10 мс и крайне высокой надёжности доставки [5].

На этом фоне международный союз железных дорог (UIC) инициировал создание перспективной системы мобильной связи Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) на базе сетей радиодоступа 4G и 5G, транспортных сетей связи и серверов приложений сети для железных дорог [6]. FRMCS – это отраслевой профиль и архитектурная модель, описывающая сервисы, интерфейсы и требования железной дороги, тогда как стандарт 5GAdvanced [7] выступает технологической платформой, на которой эти требования могут быть реализованы с заданными ключевыми показателями эффективности [8].

II. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Цифровая трансформация железных дорог представляет собой системный переход от традиционной модели управления железнодорожным транспортом, основанной на изолированных аналоговых и ранних цифровых подсистемах, к интегрированной цифровой экосистеме, в которой данные, алгоритмы и коммуникации становятся основой принятия решений на всех уровнях – от управления движением отдельного поезда до планирования работы всей сети.

Исторически железнодорожные системы строились по принципу функциональной изоляции: сигнализация,

связь, тяга, диагностика, управление расписанием и пассажирские сервисы разрабатывались и эксплуатировались как отдельные, слабо связанные между собой контуры. Каждый из них имел собственные стандарты, протоколы, каналы передачи данных и жизненные циклы оборудования. Такая архитектура обеспечивала высокую надёжность отдельных подсистем, однако ограничивала возможности для оптимизации системы в целом: данные одного контура были недоступны другому, а координация между подсистемами осуществлялась преимущественно через человека – машиниста, диспетчера, обходчика.

Цифровая трансформация меняет эту парадигму по нескольким направлениям одновременно.

Интеграция данных и принятия решений. Вместо изолированных контуров формируется единое цифровое пространство, в котором данные о состоянии пути, подвижного состава, систем электроснабжения, погодных условиях, пассажиропотоке и расписании доступны для совместного анализа. Это позволяет, например, корректировать режим движения поезда не только по сигналам светофора, но и с учётом текущего состояния пути впереди, прогноза энергопотребления, фактического расписания соседних поездов и данных о загрузке станций.

Автоматизация эксплуатационных процессов. Цифровые технологии позволяют последовательно автоматизировать функции, ранее выполнявшиеся персоналом: от автоматического ведения поезда (Automatic Train Operation, ATO) и автоматического управления движением на участке (Automatic Train Supervision, ATS) до предсказывающего технического обслуживания (Condition-Based Maintenance, CBM), при котором ремонт выполняется не по жёсткому графику, а по фактическому состоянию оборудования, определяемому непрерывным мониторингом.

Переход к управлению на основе связи. Ключевой элемент цифровой трансформации – замена физической инфраструктуры определения местоположения поезда (рельсовые цепи, счётчики осей) на системы, основанные на радиосвязи и бортовом позиционировании. Этот переход, реализуемый в рамках эволюции ETCS от Level 2 к Level 3, позволяет перейти от фиксированных блок-участков к подвижным, что существенно повышает пропускную способность линии. Но он же превращает канал связи из вспомогательного элемента в критический компонент системы безопасности.

Расширение сенсорного покрытия. Современный высокоскоростной поезд и путевая инфраструктура оснащаются сотнями и тысячами датчиков: вибрации ходовой части, температуры букс, состояния контактной сети, геометрии пути, аэродинамических нагрузок, параметров тяговых преобразователей. Данные этих датчиков формируют основу для предсказывающей диагностики и цифровых двойников

– виртуальных моделей поезда и инфраструктуры, непрерывно обновляемых по данным реальных измерений. Передача этого объёма данных требует широкополосных каналов связи, принципиально недоступных в рамках GSM-R.

Цифровая трансформация открывает возможности для эксплуатационных моделей, невозможных в аналоговом стандарте. К ним относятся: виртуальная сцепка (Virtual Coupling) – координированное движение поездов на сокращённых интервалах без физического соединения; полностью беспилотная эксплуатация (GoA4) на магистральных линиях; динамическое управление расписанием в реальном времени с учётом фактической обстановки; интеграция железнодорожного транспорта в мультимодальные цифровые платформы мобильности (Mobility-as-a-Service, MaaS).

Помимо технологических задач, цифровая трансформация включает создание непрерывной цифровой среды для пассажиров: высокоскоростной интернет на борту, информирование в реальном времени, мобильные приложения для покупки билетов и навигации, а также системы связи пассажир–оператор, которые при беспилотной эксплуатации замещают функции бортового персонала.

Все перечисленные направления объединяет одно общее требование: наличие надёжной, широкополосной и управляемой системы связи, способной одновременно обслуживать критические контуры управления и безопасности, технологические потоки данных и пассажирские сервисы – при высокой скорости движения и в сложных условиях распространения радиосигнала. Таким образом, встает задача перехода от GSM-R к FRMCS и цифровой трансформации железных дорог в целом.

III. АРХИТЕКТУРНЫЕ ОСНОВЫ FRMCS

Архитектурная идея FRMCS состоит в разделении того, что относительно стабильно в железнодорожной отрасли (сервисы, интерфейсы, требования), и того, что быстро меняется в телеком-технологиях (поколения радиосистем и реализация ядра сети). Такая логика зафиксирована в ETSI TR 103 459, где используется трёхуровневая модель: логический, технический и физический уровни [9].

На логическом уровне (Рис.1) FRMCS описывает прикладные сервисы и взаимодействие компонентов: голосовая связь, передача данных для управления, сервисы персонала, видео, диагностика и другие приложения. Здесь важно, что требования формулируются без привязки к конкретной радиотехнологии: задача: определить, какие сервисы должны работать и какие ключевые показатели эффективности (КПЭ) они должны выполнять.

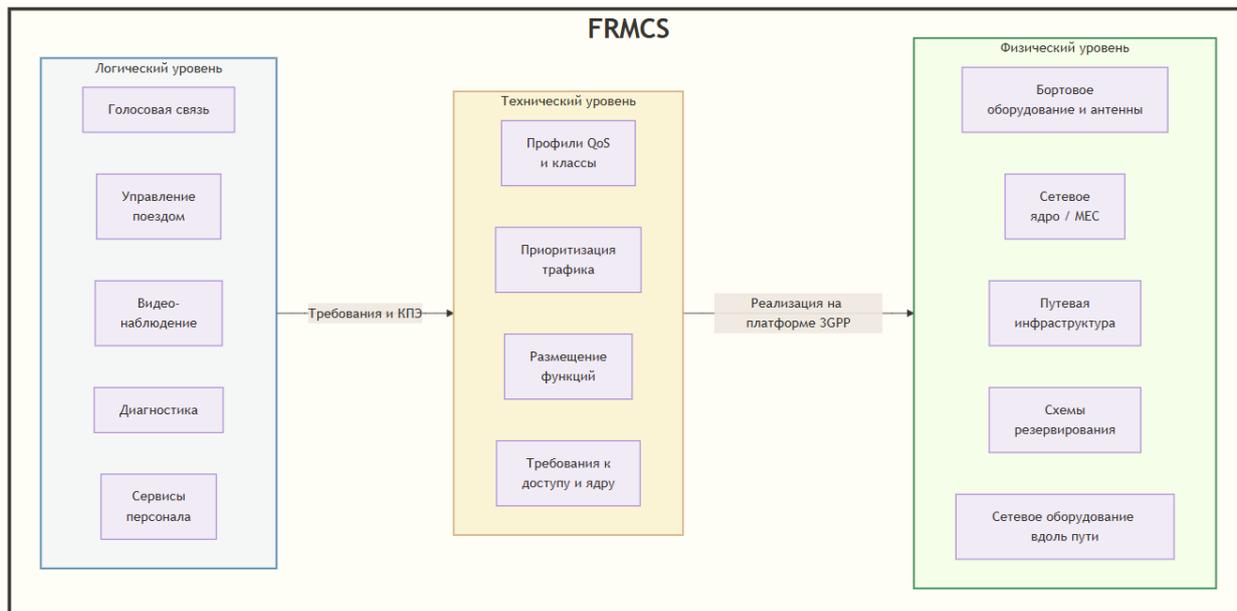


Рис. 1. Архитектурные основы FRMCS

На техническом уровне логические требования сопоставляются с возможностями платформы 3GPP: профили качества обслуживания, приоритеты, механизмы разделения трафика по классам, а также варианты размещения функций в сети. Это позволяет выразить требования железной дороги в терминах, которые затем можно реализовать настройкой сети 5G/5G Advanced.

На физическом уровне описывается практическая реализация: расположение оборудования на борту поезда, вдоль линии, на технологических площадках, а также схема резервирования и плотность размещения инфраструктуры. Для высокоскоростных линий этот уровень критичен: именно здесь проявляются эффекты мобильности и частых переключений между сотами.

IV. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Переход от GSM-R к FRMCS не является заменой одной радиотехнологии на другую. Это переход от старой узкоспециальной сети (только голос + немного данных) к полноценной современной цифровой платформе на базе обычного 5G. Всё, что даёт прирост скорости, надёжности и минимальную задержку – это стандартный 5G. А FRMCS – это набор чётких железнодорожных требований и сервисов, которые заставляют эту сеть работать именно так, как нужно поездам, а не как обычному смартфону в руках пассажира.

Для железной дороги на высоких скоростях «качество связи» – это не только скорость передачи. Критично, чтобы сеть гарантировала нужные показатели именно в сложные моменты: при переключениях между

базовыми станциями, в тоннелях, на границах покрытия и при смешанной нагрузке. Поэтому важно различать:

- радиозадержку между поездом и базовой станцией;
- сквозную задержку E2E (время от приложения до приложения, включая транспортную сеть и обработку на серверах).

Одна и та же радиотехнология может давать разные E2E результаты в зависимости от архитектуры. Например, если критические данные обрабатываются в удалённом датацентре, пакет проходит длинный маршрут и несколько узлов обработки; это увеличивает задержку и делает её менее стабильной. Если же приложение размещено на ближайшем технологическом узле вдоль линии, маршрут короче, и E2E-задержка становится меньше и предсказуемее. Поэтому сравнение технологий для высокоскоростных линий всегда должно включать архитектурный аспект: где находится «точка принятия решения» и как проходит трафик.

В Табл. I показано сравнение GSM-R, LTE-ориентированных решений и платформы 3GPP 5G/5G-Advanced с позиции пригодности для ВСЖД. Из сравнения видно, что GSM-R, будучи изначально системой для надёжной голосовой связи и ограниченного объёма данных сигнализации, имеет архитектурные ограничения по пакетной передаче данных и задержке, что затрудняет поддержку современных цифровых сервисов и параллельных потоков данных. LTE-ориентированные решения существенно расширяют доступную полосу и снижают задержку до десятков миллисекунд, что делает возможными широкополосные сервисы (видео, диагностика), однако для перспективных контуров

ТАБЛИЦА I
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ СВЯЗИ ДЛЯ ВСЖД

Параметр	GSM-R	LTE-R	5G (NR)	5G-Advanced (5G-A)	FRMCS (на базе 5G/5G-A)
Технологическая основа	2G (GSM)	4G (LTE)	5G NR (Rel.15–17)	5G NR (Rel.18+)	Архитектурный профиль ETSI/3GPP
Пик. скорость DL	≤171 кбит/с	100–300 Мбит/с	1–2 Гбит/с	3–10 Гбит/с	Определяется 5G-A
Пик. скорость UL	≤14,4 кбит/с	50–150 Мбит/с	0,5–1 Гбит/с	0,7–2+ Гбит/с	Определяется 5G-A
Типовая задержка	400–500 мс	20–50 мс	1–10 мс (uRLLC)	<10 мс (eURLLC)	≤10 мс (требование для крит. сервисов)
Надёжность/уровень сервиса	Высокая (голос)	Умеренная/высокая	Высокая (изоляция трафика)	Крайне высокая	Целевой уровень до 99,9999%
Ключевые сервисы	Голос, баз. данные	VoLTE, HD-видео	eMBB, mMTC, uRLLC	RedCap, ISAC, AI/ML	MCX, ETCS L3, ATO, Virtual Coupling
Статус для ВСЖД	Массовое (2000-е)	Пилоты/нишевые	Пилоты	Коммерция (отд. рынки)	Планируемое внедрение (горизонт ~2035)

автоматизации и управления движением на ВСЖД ключевым становится не столько «средняя задержка», сколько устойчивое выполнение требований в условиях высокой мобильности и частых переключений между сотами.

В строке «Ключевые сервисы» таблицы использованы типовые классы услуг 5G. Широкополосная мобильная связь (eMBB) относится к приложениям, где важна высокая пропускная способность, например, пассажирский интернет, видеопотоки, часть задач видеонаблюдения. Массовое подключение устройств (mMTC) соответствует сценариям с большим числом датчиков и телеметрией, характерным для мониторинга инфраструктуры и подвижного состава. Сверхнадёжная связь с малой задержкой (uRLLC) относится к критическим по времени приложениям, где важны минимальная задержка и высокая вероятность доставки сообщений «в срок». Для 5G-Advanced дополнительно отмечены направления развития, повышающие практическую применимость платформы в железнодорожной среде: облегчённые устройства для технологического мониторинга (RedCap) технологии «Интернета вещей», перспективные функции совместного использования радиосети для связи и зондирования (ISAC) и расширение автоматизации управления радиосетью с применением алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения (AI/ML).

FRMCS представляет собой отраслевой набор требований и сервисов железнодорожной связи, реализуемый на базе сетей 3GPP. В этот набор входят критически важная связь для персонала (MCX), функции управления движением (включая развитие ETCS до уровня 3), автоматическое управление поездом (ATO) и перспективные кооперативные режимы, такие как «виртуальная сцепка» (Virtual Coupling). В итоге, 5G/5G-Advanced задаёт технологическую платформу (радиодоступ и ядро

сети), а FRMCS – состав железнодорожных сервисов и целевые показатели их качества.

Виртуальная сцепка (Virtual Coupling) – это инновационная концепция, позволяющая поездам работать в скоординированных виртуальных колоннах без физического соединения. Она использует связь между поездами, бортовые датчики и передовые системы управления для обеспечения синхронного движения независимых поездов на относительно небольших расстояниях друг от друга, тем самым увеличивая пропускную способность путей. Это следующий крупный шаг вперед в управлении железнодорожными перевозками, оптимизирующий операции, а также повышающий совместимость, гибкость и надёжность расписаний движения поездов. Виртуальная сцепка обеспечивает решение проблемы за счёт сокращения интервалов между поездами, динамического формирования колонн и стратегий совместного управления. Эти инновации увеличивают пропускную способность линии без дополнительных путей, обеспечивают большую операционную гибкость за счёт динамической сцепки и расцепки, позволяют экономить энергию за счёт скоординированных маневров, а также повышают надёжность и пунктуальность обслуживания.

V. ЭВОЛЮЦИЯ 5G И ФУНКЦИИ, ВАЖНЫЕ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Внедрение 5G Advanced в железнодорожной сфере ориентировано прежде всего на обеспечение стабильного и предсказуемого качества связи в эксплуатации, а не только на рост максимальной пропускной способности. Для высокоскоростной железной дороги ключевой вопрос состоит в том, сможет ли сеть устойчиво удерживать заданные ключевые показатели эффективности, например, E2E задержку порядка 10 мс для критических сообщений и высокую вероятность доставки «в срок» при скорости

300–350 км/ч, в моменты переключений между сотами и при фоновой нагрузке от видео и сервисных данных [10].

Важны не только средние значения, но и «хвосты» распределений: что происходит с задержкой и потерями в редких неблагоприятных ситуациях. Именно поэтому верификация для железной дороги должна опираться на перцентили задержки (P95/P99 и при возможности выше), а не только на среднее.

На Рис. 2 приведено сопоставление возможностей 5G (Rel.15–17) и 5G Advanced (Rel.18+) по пяти направлениям, которые наиболее критичны для ВСЖД: задержка, мобильность, управление приоритетами трафика, поддержка массовых датчиков и позиционирование [11].

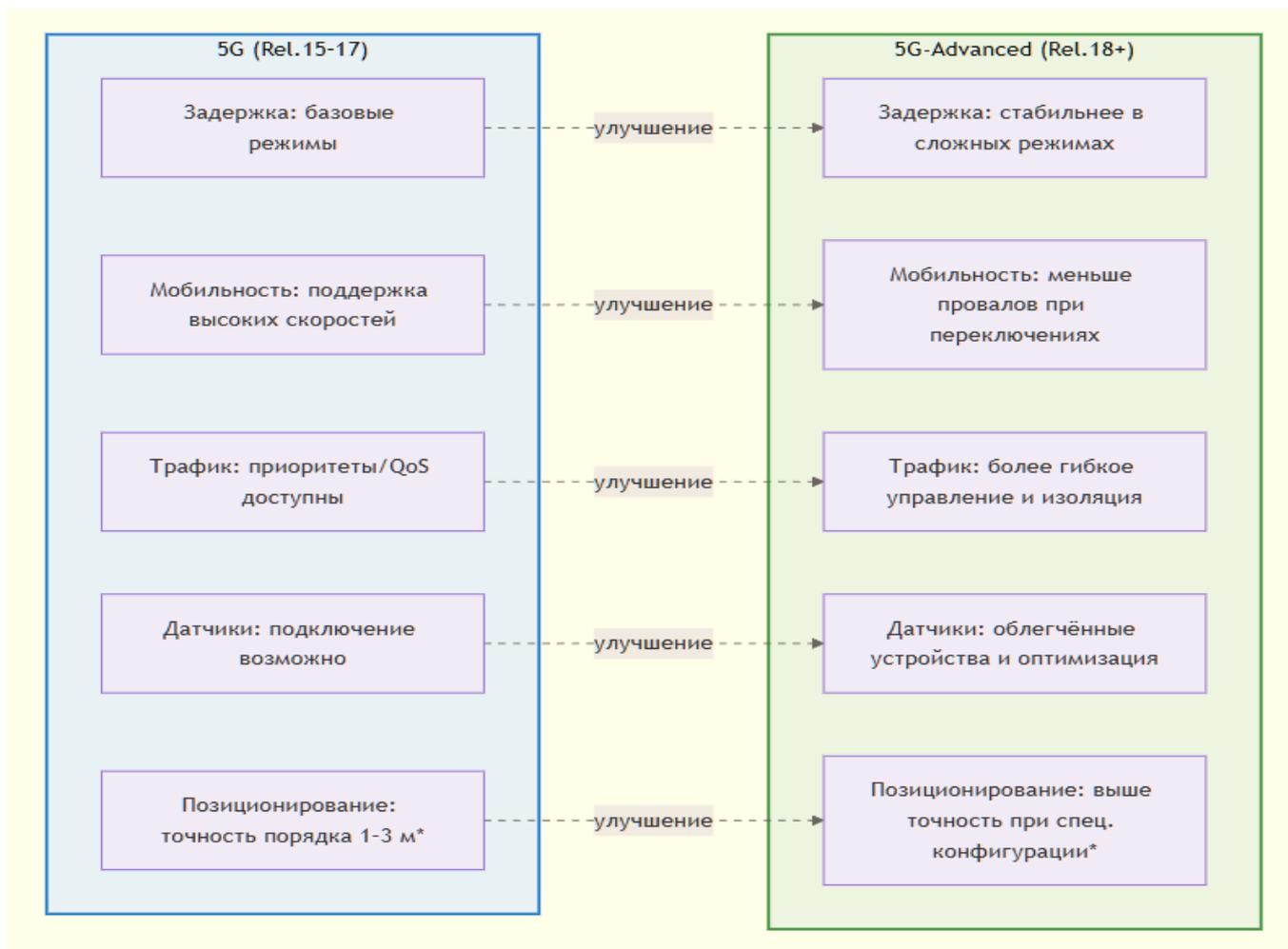


Рис. 2. Технологии 5G и 5G-Advanced: ключевые отличия для ВСЖД

На Рис. 2 показан базовый уровень функций, доступный в ранних релизах 5G и развитие этих функций в 5G-Advanced с акцентом на эксплуатационную устойчивость. Для железнодорожных сценариев ключевым является не достижение минимальных значений в условиях, близких к идеальным, а более стабильное выполнение КПЭ при высокой скорости и частых переключениях между сотами, а также возможность отделить критический трафик управления от широкополосных потоков (видео, пассажирские сервисы). Дополнительно 5G-Advanced расширяет практическую

поддержку технологического мониторинга за счёт оптимизаций для подключаемых устройств и повышает точность позиционирования при соответствующей конфигурации сети.

VI. СЦЕНАРИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И СООТВЕТСТВИЕ ВОЗМОЖНОСТЯМ 5G-ADVANCED

Задачи цифровизации железнодорожной инфраструктуры крайне разнообразны и предъявляют различные требования к сети. Часть

трафика относится к критическим контурам управления и безопасности, часть – к связи персонала, часть – к широкополосным и поддерживающим приложениям (видео, диагностика, пассажирские сервисы). Поэтому сравнение технологий связи по «пиковым скоростям» мало что говорит о пригодности для железной дороги. На передний план выходит задача обеспечения заданных параметров качества (QoS) для различных категорий сервисов. Необходимо гарантировать, что менее приоритетный трафик (общего пользования) не будет ограничивать ресурсы, выделенные для выполнения критических функций управления и безопасности

Например, видеонаблюдение требует высокой и стабильной пропускной способности, особенно в направлении uplink – от поезда к сети, но допускает большую задержку. Данные управления движением и автоматического управления поездом, наоборот, требуют малой и стабильной задержки и высокой вероятности доставки сообщений в заданное время, особенно во время переключений между сотами либо хэндоверами вдоль полотна ВСЖД [12].

В Табл. II приведена увязка типовых железнодорожных сценариев с показателями качества и механизмами сети.

ТАБЛИЦА II

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ ВСЖД С КЛЮЧЕВЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ТРЕБОВАНИЯМИ К НАСТРОЙКЕ СЕТИ

Сценарий	Тип трафика	Главные КПЭ	Что в сети должно быть настроено/обеспечено
Управление движением (эволюция ETCS к уровню 3)	Критические данные	E2Задержка (например, ≤ 10 мс по P95/P99 для заданных условий), доставка «в срок», высокая доступность	Приоритет и защита ресурса для критического трафика; отдельные профили качества; минимизация E2Маршрута (в т.ч. размещение серверов ближе к линии при необходимости)
Автоматическое управление поездом (АТО)	Критическое управление + телеметрия	Малые задержки и их стабильность; устойчивость на переключениях	Профили качества для управления; настройки мобильности и резервирование; контроль качества на хэндоверах
«Виртуальная сцепка» (VirtualCoupling)	Кооперативный обмен данными	Сверхвысокая надёжность доставки «в срок», минимальная задержка	Максимальная приоритизация; резервирование; плотное покрытие и контроль качества на хэндоверах
Видеонаблюдение	Широкополосные данные	Стабильная пропускная способность, особенно uplink	Отдельные профили качества; приоритеты по классам; при необходимости обработка видео на ближайших узлах
Диагностика и мониторинг (датчики)	Технологические данные	Надёжность доставки, масштабируемость	Профили качества для технологических данных; оптимизация подключения большого числа устройств
Связь для персонала (критически важно)	Голос/данные	Приоритет, групповая связь, доступность	Приоритет/вытеснение не критического трафика; гарантированный доступ при перегрузке
Пассажирские сервисы	Широкополосный трафик	Высокая скорость без влияния на критический трафик	Изоляция пассажирского трафика от критического; политика управления ресурсами

Таким образом, 5G-Advanced для ВСЖД определяется не только пиковыми скоростями, а способностью сети одновременно обеспечить разные профили качества для критических и некритических сервисов и удерживать их в высокоподвижных режимах.

VII. БЕСПИЛОТНЫЕ РЕЖИМЫ GOA3/GOA4

Автоматизация железнодорожного движения эволюционировала от ручного управления, поддерживаемого путевой сигнализацией, к последовательно более высоким уровням бортовой цифровой мощности обработки данных, чему в основном способствовали требования по безопасности, пропускной способности и энергоэффективности. Ранние внедрения были сосредоточены на кабинной сигнализации и системах автоматической поездной защиты (Automatic Train Protection, ATP),

обеспечивающих непрерывный контроль скорости и принудительное применение торможения при нарушении эксплуатационных ограничений. Поверх такого защитного уровня автоматическое ведение поезда Automatic Train Operation (АТО) обеспечило автоматическое выполнение режимов движения таких как тяга, выбег, торможение, точная остановка, улучшая пунктуальность, комфорт и показатели энергопотребления. В последние годы переход к цифровым экосистемам управления поездом – например «управление движением поездов на основе радиосвязи» (Communication-Based Train Control, CBTC) в метрополитенах и Европейская система управления движением поездов (European Train Control System ETCS) на магистральных и высокоскоростных линиях – сделал возможной более тесную интеграцию между защитными ограничениями, диспетчерским управлением и бортовым контуром управления.

Степень автоматизации обычно описывается классификацией Grade of Automation (GoA),

определённой в стандарте IEC 62290-1 [13] и включающей пять уровней:

- GoA0 – ручное управление на линию прямой видимости без какой-либо бортовой автоматической защиты. Машинист самостоятельно определяет допустимую скорость по напольным сигналам и несёт полную ответственность за безопасное ведение поезда. Данный уровень характерен для трамвайных линий и отдельных маневровых зон.

- GoA1 – ручное управление с автоматической защитой (АТР). Машинист управляет тягой и торможением, однако бортовая система непрерывно контролирует соблюдение допустимой скорости и разрешения на движение; при нарушении ограничений автоматически инициируется принудительное торможение. Этот уровень соответствует большинству современных магистральных линий, оборудованных, например, ETCS Level 1 или Level 2.

- GoA2 – полуавтоматическое ведение (Semi-Automatic Train Operation, STO). АТО выполняет управление тягой, выбегом и торможением, включая точную остановку у платформы; машинист присутствует в кабине, контролирует состояние дверей, подаёт команду на отправление и вмешивается при нештатных ситуациях. Данный уровень широко применяется в метрополитенах и пилотных проектах АТО over ETCS на магистральных линиях.

- GoA3 – автоматическое ведение в штатных режимах при наличии персонала на борту (Driverless Train Operation – DTO). Поезд автоматически осуществляет движение, включая управление дверями и отправление, однако на борту сохраняется оператор (trainattendant), выполняющий функции при нештатных режимах: эвакуация пассажиров, ручное управление при деградированных режимах, взаимодействие с диспетчерским центром.

- GoA4 – полностью необслуживаемая эксплуатация (Unattended Train Operation – UTO). Персонал на борту отсутствует, поэтому система управления должна автономно покрывать существенно более широкий набор ситуаций, включая безопасные переходы между режимами, реакции на отказы и процедуры восстановления, при возможной поддержке удалённого надзора.

А. Ключевые инженерные вызовы GoA3/GoA4

Достижение GoA3/GoA4 на высокоскоростных и магистральных линиях остаётся сложной задачей из-за следующих причин.

- Вычисления оптимального профиля скорости/позиции по нескольким показателям при строгих ограничениях ETCS и физических ограничениях поезда.

- Устойчивого слежения за траекторией при нелинейности модели и внешних/параметрических

возмущениях (сцепление, уклон/кривая, насыщение приводов).

- Управления переходами режимов при защитных вмешательствах ETCS и при отказах-ограничениях оборудования.

- Сертификационных и кибербезопасностных ограничений.

Распространённым подходом к решению указанных задач является иерархическая архитектура, объединяющая планирование траектории в реальном времени, контур слежения с учётом ограничений и неопределённостей, а также супервизорный уровень (часто реализуемый на основе конечного автомата) для управления логикой режимов и обеспечения плавных переключений между контроллерами без скачков управляющего сигнала. В отличие от метрополитена, где реализация GoA4 во многом упрощается благодаря замкнутой и строго контролируемой эксплуатационной среде, на магистральных и высокоскоростных линиях внедрение, как правило, осуществляется в рамках концепции АТО, работающий в пределах ограничений ETCS, в которой ETCS задаёт и контролирует защитные ограничения, а АТО обеспечивает оптимальное и нормативно-совместимое ведение поезда в пределах этих ограничений.

В. Роль канала связи в контуре управления и ограничения GSM-R

Каждая из перечисленных задач автоматизации неявно предполагает наличие надёжного, предсказуемого и достаточно широкополосного канала связи между поездом и путевой инфраструктурой. На уровнях GoA1–GoA2 роль этого канала относительно ограничена: он используется преимущественно для передачи разрешений на движение (Movement Authority, MA), обновлений ограничений скорости и отчётов о позиции поезда в рамках ETCS Level 2 [14]. Объём передаваемых данных невелик (порядка единиц килобайт на сообщение), частота обмена – единицы Герц, а допустимая задержка измеряется сотнями миллисекунд. В этих условиях GSM-R, спроектированный именно как выделенный узкополосный канал для голосовой связи и ограниченного объёма данных сигнализации, был архитектурно адекватен решаемой задаче [15].

С переходом к GoA3 и особенно GoA4 характер взаимодействия поезда с инфраструктурой принципиально меняется, и канал связи из вспомогательного элемента превращается в критический компонент контура управления. Это обусловлено несколькими факторами.

Во-первых, при отсутствии машиниста (GoA4) или при ограничении его функций до надзорных (GoA3) бортовая система АТО должна в реальном времени получать актуальные данные от центра управления движением (Traffic Management System, TMS) и от путевого оборудования ETCS: обновлённые

разрешения на движение, оперативные корректировки графика, временные ограничения скорости, информацию о состоянии маршрута. В отличие от GoA1/GoA2, где задержка в получении этих данных компенсируется реакцией машиниста, в автоматическом режиме любая задержка или потеря сообщения непосредственно влияет на качество управления – а в предельном случае вынуждает систему перейти в безопасное состояние (как правило, контролируемую остановку), что снижает эксплуатационную доступность линии.

Во-вторых, GoA3/GoA4 требуют устойчивой обратной связи от поезда к инфраструктуре. Бортовая система должна непрерывно передавать отчёты о позиции, скорости, состоянии тормозной и тяговой систем, а также диагностическую телеметрию, необходимую для удалённого надзора. При GoA4 к этому добавляются потоки видеонаблюдения из кабины и салона (для дистанционного контроля обстановки оператором из центра управления), чтократно увеличивает требования к пропускной способности восходящего канала (uplink) – параметру, в котором GSM-R наиболее ограничен (теоретический максимум 14,4 кбит/с в направлении от поезда к сети) [16-17].

В-третьих, перспективные концепции повышения пропускной способности – прежде всего ETCS Level 3 с подвижными блок-участками и виртуальная сцепка (Virtual Coupling) – предъявляют качественно новые требования к каналу связи. ETCS Level 3 предполагает, что определение свободности пути основывается на отчётах самих поездов о своей позиции, а не на стационарных рельсовых цепях или счётчиках осей [6]. Это означает, что надёжность и своевременность доставки отчётов о позиции становятся элементами цепи обеспечения безопасности (safety-critical). Виртуальная сцепка идёт ещё дальше: координированное движение поездов на сокращённых интервалах требует прямого обмена данными между составами (V2V) с задержкой порядка единиц миллисекунд и вероятностью доставки «в срок», измеряемой величинами 99,999% и выше [18-19]. Ни один из этих сценариев не реализуем в рамках архитектуры GSM-R.

В-четвёртых, системы автоматического управления GoA3/GoA4 порождают значительно более разнообразный и объёмный трафик, чем традиционная связь ETCS Level 2. Помимо критических данных управления движением, сеть должна одновременно обслуживать потоки диагностики и предиктивного мониторинга (Condition-Based Maintenance – CBM), массовую телеметрию от бортовых и путевых IoT-датчиков, видеопотоки для удалённого надзора и обнаружения препятствий, а также обеспечивать связь пассажир-центр управления, замещающую функции отсутствующего бортового персонала. Эти потоки различаются по требованиям к задержке, надёжности и

пропускной способности, и ключевой задачей становится не просто «передача данных», а гарантированное разделение сервисов по классам качества – с тем, чтобы широкополосный трафик видеонаблюдения или пассажирского интернета не мог повлиять на своевременную доставку критических сообщений управления.

Именно здесь ограничения GSM-R приобретают не эксплуатационный, а архитектурный характер. Теоретический максимум скорости передачи данных GSM-R составляет 172 кбит/с по нисходящей линии (DL), однако в реальных условиях пакетный трафик через GPRS ограничивается от единиц до десятков кбит/с, а задержка может достигать 400–500 мс. Эти значения несовместимы с целевыми показателями критических сервисов, определёнными в документах 3GPP (TS 22.289) для перспективных железнодорожных приложений: задержка менее 10 мс по высоким перцентильям и вероятность доставки «в срок» порядка 99,999%. Более того, GSM-R не поддерживает развитые механизмы разграничения QoS и логической изоляции ресурсов, сопоставимые с 4G/5G (QoS flows, GBR-профили, admission control по SLA, сетевой слайсинг). В результате при наличии конкурирующей нагрузки обеспечить предсказуемые задержки и гарантированную пропускную способность для критически важных сервисов существенно сложнее, чем в 5G.

Таким образом, переход к высоким уровням автоматизации (GoA3/GoA4) создаёт системное требование к каналу связи, которое не может быть удовлетворено эволюционным развитием GSM-R. Необходима платформа, способная одновременно обеспечивать следующее.

1. Малую и стабильную сквозную задержку (E2E менее 10 мс) для критических контуров управления движением и АТО.
2. Высокую и предсказуемую пропускную способность, особенно в восходящем направлении (uplink), для видеонаблюдения, телеметрии и удалённого надзора.
3. Гарантированное разделение сервисов по классам качества, обеспечивающее защиту критического трафика от влияния широкополосных потоков.
4. Устойчивое выполнение указанных показателей при высокой мобильности (300–350 км/ч), в моменты переключений между сотами (хэндоверов) и в сложных условиях распространения (тоннели, виадуки, встречный разъезд составов).
5. Масштабируемость для подключения большого числа бортовых и путевых датчиков.
6. Архитектурную поддержку прямого обмена данными между поездами (V2V) для перспективных кооперативных режимов.

Именно эти требования легли в основу концепции FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), инициированной Международным союзом железных

дорог (UIC) и реализуемой как отраслевой профиль на платформе 3GPP 5G/5G-Advanced.

Таким образом, связь между уровнем автоматизации и требованиями к системе связи, является не косвенной, а прямой и усиливающейся: чем выше GoA, тем более критичным элементом контура управления становится канал связи, и тем жёстче требования к его характеристикам [19-20]. Внедрение FRMCS на базе 5G/5G-Advanced открывает практическую возможность реализации ETCS Level 3, АТО GoA3/GoA4 и Virtual Coupling – ключевых концепций будущей эксплуатации высокоскоростных железных дорог.

VIII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Канал связи как критический элемент системы управления. Переход к автоматическому управлению поездом (GoA3/GoA4), подвижным блок-участкам (ETCS Level 3) и виртуальной сцепке превращает канал связи «поезд–земля» из вспомогательного средства в компонент контура безопасности, от которого непосредственно зависят эксплуатационная доступность и пропускная способность линии.

2. GSM-R архитектурно исчерпана. Ограничения GSM-R – пиковая скорость 172 кбит/с (DL) и 14,4 кбит/с (UL), задержка 400–500 мс, отсутствие механизмов управления приоритетами и разграничения трафика — несовместимы с требованиями перспективных сервисов (E2E-задержка менее 10 мс, широкополосная телеметрия, разделение критического и некритического трафика) и не могут быть устранены эволюционным развитием стандарта.

3. FRMCS – это архитектурный профиль, а не радиотехнология. Трёхуровневая архитектура FRMCS разделяет стабильные железнодорожные требования (сервисы, интерфейсы, КПЭ) и быстро сменяющиеся телекоммуникационные платформы, что защищает инвестиции от технологического устаревания и обеспечивает эволюционный путь развития.

4. 5G/5G-Advanced обеспечивает технологическую базу для реализации FRMCS. Для ВСЖД критичны не пиковые скорости, а устойчивое выполнение КПЭ при скоростях 300–400 км/ч, частых хэндоверах и смешанной нагрузке. 5G-Advanced усиливает базовый 5G NR в ключевых для железной дороги направлениях: стабильность задержки при высокой мобильности, поддержка массовых датчиков (RedCap), точное позиционирование и автоматизация управления сетью (AI/ML).

5. Ключевое требование – способность сети обслуживать разнородные сервисы с гарантированным качеством для каждого из них. Пригодность системы связи для ВСЖД определяется способностью одновременно обеспечивать различные профили качества: малую задержку для управления движением, высокую пропускную способность для видео и диагностики, масштабируемость для IoT-

датчиков – при гарантированной изоляции критического трафика от пассажирских и широкополосных потоков.

6. Уровень автоматизации прямо определяет требования к связи. Зависимость между GoA и характеристиками канала связи является прямой и усиливающейся: чем выше степень автоматизации, тем больше функций делегируется автоматической системе, тем критичнее роль связи и тем жёстче требования к задержке, надёжности и пропускной способности.

7. Переход к FRMCS – необходимое условие цифровой трансформации. Внедрение FRMCS на базе 5G/5G-Advanced является не отдельным телекоммуникационным проектом, а инфраструктурным условием для реализации всей совокупности целей: от беспилотной эксплуатации и повышения пропускной способности до обеспечения пассажиров высокоскоростным интернетом, поддерживающим экономическую активность при перемещении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Use of 3GPP Technologies by Railways [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.3gpp.org/technologies/railways1> (дата обращения: 21.02.2026).
- [2] International Union of Railways (UIC). European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). Functional Requirements Specification (FRS). Version 8.1.0 (EIRENE FRS-8.1.0). Version 1.0.0. February 2023. — Paris: UIC, 2023. — 130 p. — ISBN 2-7461-1831-7 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index032_-_EIRENE_FRS_v810.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [3] Knutsen D., Olsson NOE, Fu J. ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future // Journal of Intelligent and Connected Vehicles. — 2023. — No. 6(1). — Pp. 34-45. — <https://doi.org/10.26599/JICV.2023.9210003>.
- [4] Kaifeng Wang, Hui Li, Qi Zhang. Parallel Redundancy Protocol for Railway Wireless Data Communication Network // First published: — 05 April 2022. — <https://doi.org/10.1155/2022/3312569>.
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 22.289 Mobile communication system for railways: архив спецификаций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.289/ (дата обращения: 21.02.2026)
- [6] International Union of Railways (UIC). FRMCS: Future Railway Mobile Communication System [Электронный ресурс]. — 19.09.2023. URL: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs> (дата обращения: 21.02.2026).
- [7] Тихвинский В., Девяткин Е., Белявский В. По пути от 5G к 5G Advanced: Релизы 17 и 18 // Первая миля. — 2021. — №. 6. — С. 38-47.
- [8] ETSI. ETSI TR 103 459 V1.2.1 (2020-08) Rail Telecommunications (RT); Future Rail Mobile Communication System (FRMCS); Study on system architecture [Электронный ресурс]. — 2020. — 73 p. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103400_103499/103459/01_02_01_60/tr_103459v010201p.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [9] Rastoceanu F., Grozea C., Enache M., Nelega R., Kovacs G., Puschita E. Mission-Critical Services in 4G/5G and Beyond: Standardization, Key Challenges, and Future Perspectives // Sensors. — 2025. — V. 25. — 5156. — doi: 10.3390/s25165156.
- [10] Ai B., Molisch A. F., Rupp M., Zhong Z.-D. 5G Key Technologies for Smart Railways // Proceedings of the IEEE. 2020. Vol. 108, No. 6. Pp. 856–893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595.

- [11] 3GPP. RAN1, 5G-Advanced and Rel-18 Completion [Электронный ресурс] / Younsun Kim, Xiaodong Xu, David Mazzaresse. — 10.03.2024. — Обновлено: 03.04.2025. — URL: <https://www.3gpp.org/technologies/ran1-rel18> (дата обращения: 21.02.2026).
- [12] Brillhante D. da S., de Rezende J. F., Marchetti N. Handover optimisation for high-capacity low-latency 5G NR mmWave communication // Ad Hoc Networks. 2024. Vol. 153. Art. 103328. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103328.
- [13] Samsung Newsroom (Samsung Global Newsroom). World's First LTE-Railway Service on High-speed Train Goes Live in Korea, Supplied by Samsung and KT [Электронный ресурс]. — 21.12.2017. — URL: <https://news.samsung.com/global/worlds-first-lte-railway-service-on-high-speed-train-goes-live-in-korea-supplied-by-samsung-and-kt> (дата обращения: 23.02.2026).
- [14] Zhang X., He R., Ai B., Yang M., Ding J., Gao S., Qi Z., Zhang Z., Zhong Z. Cluster-Based Time-Variant Channel Characterization and Modeling for 5G-Railways: arXiv:2412.20943v1 [cs.IT]. — 30.12.2024 [Электронный ресурс]. — DOI: 10.48550/arXiv.2412.20943. — URL: <https://arxiv.org/abs/2412.20943v1> (дата обращения: 23.02.2026).
- [15] Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale // Communications of the ACM, — 2013. — No. 56(2). — Pp. 74–80.
- [16] Balasingam et al. Application-Level Service Assurance with 5G RAN Slicing (NSDI/USENIX, 2024).
- [17] ETSI TS 122 002 V19.0.0 (2025-10). Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); UMTS; Circuit Bearer Services (BS) supported by a PLMN (3GPP TS 22.002 Release 19) [Электронный ресурс]. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122000_122099/122002/19_00_00_60/ts_122002v190000p.pdf (дата обращения: 23.02.2026).
- [18] Caro J.B., Ansari J., Sachs J., de Bruin P., Sivri S., Grosjean L., König N., Schmitt R.H. Empirical Study on 5G NR Cochannel Coexistence // Electronics. — 2022. — Vol. 11, No. 11. — Art. 1676. — DOI: 10.3390/electronics11111676.
- [19] Тихвинский В., Портной С. Перспективы создания и внедрения сетей мобильной железнодорожной связи FRMCS // ПЕРВАЯ МИЛИА. 2021. № 3 С. 54–64.
- [20] Тихвинский В.О., Портной С.Л., Сивицкий П.А., Тихонюк А.И. Эволюция технологий сети FRMCS в релизах 3GPP: вызовы и перспективы // ПЕРВАЯ МИЛИА. 2023. № 2 С. 56–64.

Информация об авторах

Мартынов Сергей Владимирович – магистрант направления подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, sergeytm@mail.ru.

Осовский Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Кутузов Денис Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, d_kutuzov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7963-1259

5G/5G-Advanced network standards for digital transformation of railways and the development of intelligent transport systems

S.V. Martynov, A.V. Osovsky, D.V. Kutuzov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – Transition from the contemporary GSM-R railway communication system to the future FRMCS on LTE/5G technologies as a necessary condition of implementing high levels for train automation (GoA3/GoA4) was described. Papers standardizing FRMCS system and equipment requirements within the International Union of Railways (UIC), the 3GPP consortium, and the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) was reviewed. An overview of the GSM-R standard evolution is presented. Its architectural limitations in the issues of the requirements of future traffic control and autonomous driving services were highlighted. A comparative analysis of GSM-R, LTE-R, 5G, and 5G-Advanced was provided for high-speed railway applications. We show a direct relationship between the grade of automation (GoA) and the requirements for the train-to-ground communication channel.

Keywords – high-speed railway, 5G-Advanced, FRMCS, GoA3/GoA4, GSM-R.

References

- [1] Use of 3GPP Technologies by Railways [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.3gpp.org/technologies/railways1> (дата обращения: 21.02.2026).
- [2] International Union of Railways (UIC). European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). Functional Requirements Specification (FRS). Version 8.1.0 (EIRENE FRS-8.1.0). Version 1.0.0. February 2023. — Paris: UIC, 2023. — 130 p. — ISBN 2-7461-1831-7 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index032_-_EIRENE_FRS_v810.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [3] Knutsen D., Olsson NOE, Fu J. ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future // Journal of Intelligent and Connected Vehicles. — 2023. — No. 6(1). — Pp. 34–45. — <https://doi.org/10.26599/JICV.2023.9210003>.
- [4] Kaifeng Wang, Hui Li, Qi Zhang. Parallel Redundancy Protocol for Railway Wireless Data Communication Network // First published: — 05 April 2022. — <https://doi.org/10.1155/2022/3312569>.
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 22.289 Mobile communication system for railways: архив спецификаций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.289/ (дата обращения: 21.02.2026).
- [6] International Union of Railways (UIC). FRMCS: Future Railway Mobile Communication System [Электронный ресурс]. — 19.09.2023. URL: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs> (дата обращения: 21.02.2026).
- [7] Tihvinskij V., Devyatkin E., Belyavskij V. Po puti ot 5G k 5G Advanced: Relizy 17 i 18 // Pervaya milya. — 2021. — №. 6. — S. 38–47.
- [8] ETSI. ETSI TR 103 459 V1.2.1 (2020-08) Rail Telecommunications (RT); Future Rail Mobile Communication System (FRMCS); Study on system architecture [Электронный ресурс]. — 2020. — 73 p. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103400_103499/103459/01_02_01_60/tr_103459v010201r.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [9] Rastoceanu F., Grozea C., Enache M., Nelega R., Kovacs G., Puschita E. Mission-Critical Services in 4G/5G and Beyond:

- Standardization, Key Challenges, and Future Perspectives // Sensors. – 2025. – V. 25. – 5156. – doi: 10.3390/s25165156.
- [10] Ai B., Molisch A. F., Rupp M., Zhong Z.-D. 5G Key Technologies for Smart Railways // Proceedings of the IEEE. 2020. Vol. 108, No. 6. Pp. 856–893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595.
- [11] 3GPP. RAN1, 5G-Advanced and Rel-18 Completion [Электронный ресурс] / Younsun Kim, Xiaodong Xu, David Mazzaresse. — 10.03.2024. — Обновлено: 03.04.2025. — URL: <https://www.3gpp.org/technologies/ran1-rel18> (дата обращения: 21.02.2026).
- [12] Brilhante D. da S., de Rezende J. F., Marchetti N. Handover optimisation for high-capacity low-latency 5G NR mmWave communication // Ad Hoc Networks. 2024. Vol. 153. Art. 103328. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103328.
- [13] Samsung Newsroom (Samsung Global Newsroom). World's First LTE-Railway Service on High-speed Train Goes Live in Korea, Supplied by Samsung and KT [Электронный ресурс]. — 21.12.2017. — URL: <https://news.samsung.com/global/worlds-first-lte-railway-service-on-high-speed-train-goes-live-in-korea-supplied-by-samsung-and-kt> (дата обращения: 23.02.2026).
- [14] Zhang X., He R., Ai B., Yang M., Ding J., Gao S., Qi Z., Zhang Z., Zhong Z. Cluster-Based Time-Variant Channel Characterization and Modeling for 5G-Railways: arXiv:2412.20943v1 [cs.IT]. — 30.12.2024 [Электронный ресурс]. — DOI: 10.48550/arXiv.2412.20943. — URL: <https://arxiv.org/abs/2412.20943v1> (дата обращения: 23.02.2026).
- [15] Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale // Communications of the ACM, – 2013. – No. 56(2). – Pp. 74–80.
- [16] Balasingam et al. Application-Level Service Assurance with 5G RAN Slicing (NSDI/USENIX, 2024).
- [17] ETSI TS 122 002 V19.0.0 (2025-10). Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); UMTS; Circuit Bearer Services (BS) supported by a PLMN (3GPP TS 22.002 Release 19) [Электронный ресурс]. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122000_122099/122002/19_00.00_60/ts_122002v190000p.pdf (дата обращения: 23.02.2026)
- [18] Caro J.B., Ansari J., Sachs J., de Bruin P., Sivri S., Grosjean L., König N., Schmitt R.H. Empirical Study on 5G NR Cochannel Coexistence // Electronics. — 2022. — Vol. 11, No. 11. — Art. 1676. — DOI: 10.3390/electronics11111676.
- [19] Tihvinskij V., Portnoj S. Perspektivy sozdaniya i vnedreniya setej mobil'noj zheleznodorozhnoj svyazi FRMCS // PERVAYa MILYa. 2021. № 3 S. 54–64.
- [20] Tihvinskij V.O., Portnoj S.L., Sivickij P.A., Tihonyuk A.I. Evolyuciya tekhnologij seti FRMCS v relizah 3GPP: vyzovy i perspektivy // PERVAYa MILYa. 2023. № 2 S. 56–64.

Information about the authors

Sergey V. Martynov – master's student in the program "Infocommunication Technologies and Communication Systems" of the Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, sergeytm@mail.ru.

Alexey V. Osovsky, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Denis V. Kutuzov, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, d_kutuzov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7963-1259

Особенности импортозамещения оборудования на выделенной сети предприятия нефтегазового сектора

А.А. Датцкий, О.Н. Пищин

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация — В статье представлен анализ архитектурных и технических недостатков выделенной сети связи, используемой на предприятии нефтегазового сектора Астраханской области. В ходе исследования выявлены ключевые ограничения применяемых импортных мультиплексоров RAD Optimux-45, такие как отсутствие поддержки передачи трафика Ethernet и наличие всего одного слота для SFP-модуля, что вынуждает предприятие арендовать дополнительные волоконно-оптические линии связи и ведёт к росту эксплуатационных расходов. В условиях необходимости технологической модернизации и импортозамещения предложен переход на отечественное оборудование — шлюзы TDMoP Zelax MM116M-24E1. Проведено сравнение характеристик старого и нового оборудования, подтверждающее преимущества российского аналога по функциональности, гибкости конфигурации и экономической эффективности. По результатам сравнения предложено заменить оборудование RAD Optimux-45 на отечественное оборудование Zelax MM116M-24E1. Предложена схема реорганизации выделенной сети с использованием оборудования Zelax, позволяющая интегрировать передачу голосового трафика, данных Ethernet и управления в единую инфраструктуру, что особенно актуально для обеспечения бесперебойной и безопасной работы объектов нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова – выделенная сеть, импортозамещение, цифровой поток E1, RAD Optimux-45, Zelax MM116M-24E1, SFP, Ethernet, телекоммуникации.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет на предприятиях нашей страны встает остро вопрос о импортозамещении оборудования, используемого на производстве. Оборудование связи – не исключение. Важно не просто заменить старое импортное оборудование, не допустив при этом снижения эффективности работы, но и наоборот, повысить ее.

Значимость задачи импортозамещения проявляется в стратегически важных отраслях экономики, таких как нефтегазовый сектор. Непрерывность и безопасность технологических процессов на месторождениях,

нефтеперерабатывающих заводах в особой степени зависят от надежности и устойчивости телекоммуникационной инфраструктуры. Выделенные сети связи на таких предприятиях выполняют жизненно важные функции: обеспечивают управление системами автоматизации, передачу данных телеметрии, голосовой связи между диспетчерскими пунктами и удаленными объектами, а также видеонаблюдение. Сбои в работе сети могут привести не только к финансовым потерям из-за остановки производства, но и к возникновению чрезвычайных ситуаций с экологическими и техногенными последствиями.

В условиях современных геополитических и экономических вызовов зависимость от иностранных поставщиков телекоммуникационного оборудования несет дополнительные риски, связанные с логистикой, технической поддержкой, обновлением программного обеспечения, а также долгосрочной эксплуатацией. Устаревшее импортное оборудование зачастую не поддерживает современные протоколы, обладает ограниченной функциональностью и высокой стоимостью обслуживания. Поэтому переход на современные отечественные аналоги становится не только вопросом технологической независимости, но и ключевым фактором повышения эффективности предприятия.

II. ВЫДЕЛЕННАЯ СЕТЬ И ОБОРУДОВАНИЕ

На предприятии установлены мультиплексоры (MUX) компании RAD Data Communications. RAD Data Communications [1] – частная корпорация со штаб-квартирой в Тель-Авиве, Израиль, которая разрабатывает и производит специализированное сетевое оборудование. RAD Optimux-45 [2] – управляемые мультиплексоры, обеспечивающие простое и экономически эффективное решение для передачи трафика множественных каналов E1 или T1, а также их комбинаций (согласно ITU G.747) по одному каналу T3 со стандартным электрическим или оптоволоконным интерфейсом.

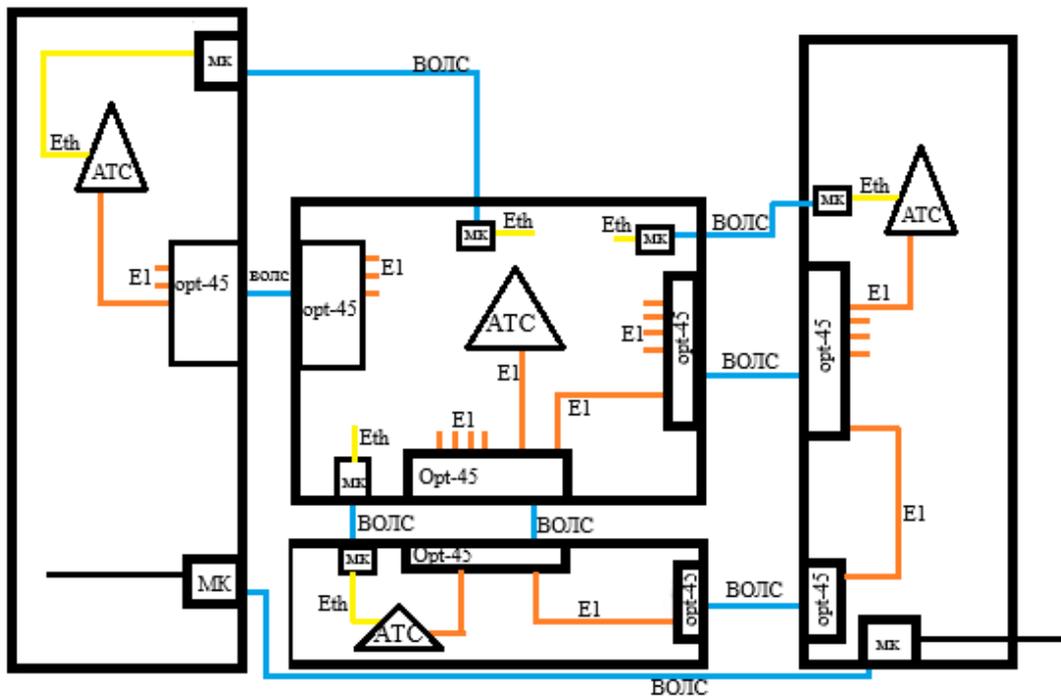


Рис. 1. Схема выделенной сети: АТС – автоматическая телефонная станция; Opt-45 – мультиплексор optimux-45 ВОЛС – волоконно-оптические линии связи; МК – медиаконвертер; E1 – 2-х мегабитный поток; Eth – Ethernet линия (управления)

Цифровой поток E1 [3–4] – стандарт цифровой передачи данных, соответствующий первичному уровню европейского стандарта PDH.

Он является результатом развития американского T1, в отличие от которого имеет 32 канала – 30 каналов для голоса или два канала для сигнализации (30B+D+H). Каналы разделяются по времени. Каждый из 32 каналов имеет пропускную способность 64 кбит/с; таким образом, общая пропускная способность E1 равна 2048 кбит/с.

Топология выделенной сети реализована в виде кольца. Схема выделенной сети представлена на Рис.1.

Как видно из Рис.1, потоки Ethernet для управления автоматическими телефонными станциями (АТС) передаются по отдельным волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС) с использованием медиаконвертеров. Так как у мультиплексоров RAD Optimux-45 отсутствует возможность передавать Ethernet потоки, предприятие тратит лишние деньги на аренду дополнительных ВОЛС. Медиаконвертер [5] – устройство, предназначенное для преобразования одного типа оптического сигнала в другой.

В Табл. I. представлены технические характеристики RAD Optimux-45.

Ключевыми недостатками мультиплексоров RAD Optimux-45 следует считать отсутствие возможности передачи Ethernet трафика (а в случае предприятия -

трафика управления) и наличие только одного Small Form-factor Pluggable (SFP) модуля.

ТАБЛИЦА I
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ RAD ОПТИМУХ-45

Uplink	T3, Fiber Optic
Bandwidth (Mbps)	45
Number of trunks	21 E1 / 28T1
Ethernet support	No
Speical features	Ring support
Slots SFP module	1

SFP модуль [6] – это миниатюрный сменный модуль-трансивер, предназначенный для сетевого оборудования. Он позволяет подключать коммутаторы и другие устройства к сетям передачи данных, используя различные типы кабелей (оптические или медные) и поддерживая скорости до 10 Гбит/с (SFP+) или выше, а также различные технологии, такие как Gigabit Ethernet, Fibre Channel. Они поддерживают возможность заменять или удалять компоненты в работающей системе (так называемую «горячую замену», hot-swappable). Это позволяет гибко настраивать сетевые соединения в зависимости от требуемой дальности и скорости.

Из-за наличия только одного модуля SFP для построения полноценного кольца необходим дополнительный комплект мультиплексоров, которые

соединены между собой медными линиями передачи данных.

Рассмотрим оборудование компании Zelax [7] – ведущего российского разработчика и производителя решений для сетей передачи данных. Репутацию производителя надежного телекоммуникационного оборудования компания заработала в результате многолетнего сотрудничества с крупнейшими предприятиями стратегически важных отраслей российской экономики и государственными структурами.

Из различного спектра оборудования компании Zelax было решено выбрать шлюзы TDMoP MM-116M-24E1 [8]. Эти шлюзы предназначены для передачи цифровых потоков G.703/E1 и высокоскоростной передачи трафика Ethernet по сети с коммутацией пакетов. Шлюзы компании обрабатывают неструктурированные и структурированные потоки G.703/E1. Выбирая каналные интервалы, можно экономить полосу пропускания. Также более рациональное использование полосы пропускания позволяет одновременная передача голосовых потоков и данных, при необходимости разделяя полосу пропускания между активными телефонными и Ethernet каналами. В Табл. II представлены технические характеристики шлюза 116M-24E1.

ТАБЛИЦА II
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ZELAX MM116M-24E1

Число портов G.703/E1	2,4,8, 16 или 24 (в зависимости от модификации)
Число портов Ethernet 10/100/1000Base-T	2 или 4 (в зависимости от модификации)
Число слотов для установки SFP/CSFP-модулей	2
Число комбо-портов 10/100/1000Base-T CSFP	0 или 1 (в зависимости от модификации)
Число портов Console	1 или 2 (в зависимости от модификации)
Число портов AUX	0 или 1 (в зависимости от модификации)
Общее число портов Ethernet	6 или 7 (в зависимости от модификации)

III. АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Сравнительные характеристики оборудования RAD Optimux-45 и Zelax MM16M-24E1 приведены в Табл. III.

ТАБЛИЦА III
СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ RAD OPTIMUX-45 И ZELAX M116M-24E1

Параметр	RAD Optimux-45	Zelax MM16M-24E1
Поддержка Eth	Нет	Да
Кол-во SFP-слотов	1	2
Порты E1	До 21	До 24
Топология	Поддержка кольца (требуется доп. Оборудование)	Гибкая конфигурация благодаря двум SFP
Передача голоса и данных	Раздельно (требуется отдельные линии)	Совместно (экономия полосы пропускания)
Доп. порты	Console	Combo-порты, Console, AUX
Экономия затрат на ВОЛС	Нет (требуется отдельные линии для Ethernet)	Да (передача Ethernet вместе с

Сравнив и проанализировав параметры оборудования, можно сделать вывод, что использование мультиплексоров RAD Optimux-45 является технологически устаревшим и экономически неэффективным решением для современной сети предприятия. Его замена на Zelax MM116M-24E1 является обязательным шагом для модернизации сети, снижения эксплуатационных расходов и повышения надёжности и гибкости инфраструктуры предприятия.

Схема организации выделенной сети связи предприятия после модернизации приведена на Рис. 2.

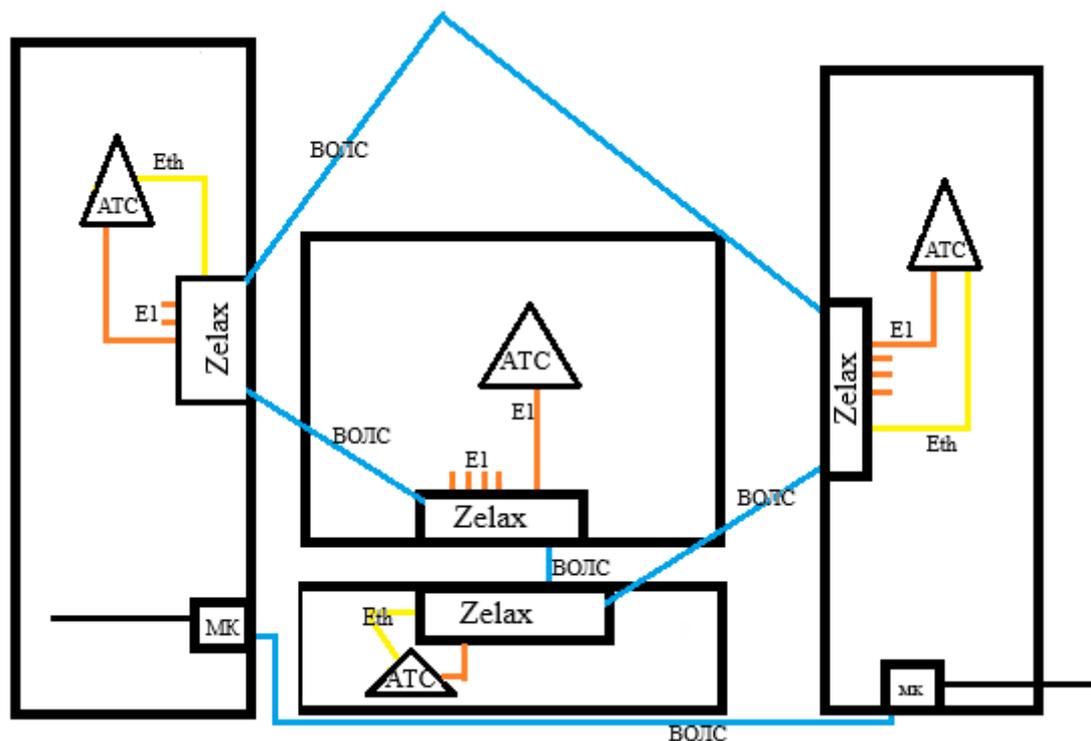


Рис.2. Схема выделенной сети с использованием Zelax MM116M-24E1: Zelax –шлюз Zelax MM116M-24E1

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведена схема выделенной сети одного из предприятий нефтегазового сектора, а также техническое описание и характеристики используемого оборудования. Для модернизации сети приведено техническое описание и характеристики отечественно оборудования компании Zelax. Таким образом, для снижения эксплуатационных расходов, повышения надёжности сети и гибкости инфраструктуры предприятия предложена модернизация существующего оборудования сети.

ЛИТЕРАТУРА

[1] О компании rad.com URL: <https://www.rad.com/> (дата обращения: 04.12.2025).
 [2] Manual RAD Optimux-45 bestdatasource.com URL: https://bestdatasource.com/rad/data_sheets/op-451.pdf (дата обращения: 18.11.2025).
 [3] Техническая диагностика современных цифровых сетей связи. Основные принципы и технические средства измерений параметров передачи для сетей PDH, SDH, IP, Ethernet и ATM : учебное пособие / И. И. Власов, Э. В. Новиков, М. М. Птичников, Д. В. Сладких ; под редакцией М. М. Птичникова. — Москва : Горячая линия-Телеком, 2012. — 552 с. — ISBN 978-5-9912-0195-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/5134> (дата обращения: 21.11.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 [4] Измалкин А.О. О разработке лабораторного комплекса по исследованию потока E1 / А.О. Измалкин // XLIX Огарёвские чтения: материалы научной конференции: в 3 частях, Саранск, 07–13 декабря 2020 года. Том Часть 1. — Саранск: Национальный исследовательский Мордовский

государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2021. — С. 312-316. — EDN KCOSPY.

[5] Основы проектирования участков транспортной сети операторов связи: Учебно-методическое пособие / О.М. Демиденко, А. А. Сорокин, А. В. Воруев [и др.]. — Гомель: Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины. — 2020. — 163 с. — ISBN 978-985-577-629-2. — EDN NQTZGW.
 [6] Гордиенко В. Н. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов / В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, Р.М. Шарафутдинов. - Москва : Горячая Линия–Телеком, 2011. - 368 с. - ISBN 978-5-9912-0146-9.
 [7] О компании Zelax.ru URL: <https://www.zelax.ru/company/> (дата обращения: 19.11.2025).
 [8] Zelax MM Техническое описание. — URL: https://www.zelax.ru/assets/docs/mm-101_116m_technical_manual.pdf (дата обращения: 19.11.2025).

Информация об авторах

Датцкий Александр Андреевич, магистр, АГТУ, Астрахань, Россия, e-mail: sane5852@gmail.com

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

Features of import substitution for equipment on a dedicated network of an oil and gas sector enterprise

A.A. Dattsky, O.N. Pishchin

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – This article presents an analysis of the architectural and technical shortcomings of a dedicated communications network used by an oil and gas company in the Astrakhan region. The study identified key limitations of the imported RAD Optimux-45 multiplexers, such as the lack of support for Ethernet traffic transmission and the availability of only one slot for an SFP module, which forces the enterprise to lease additional fiber-optic communication lines and leads to increased operating costs. Given the need for technological modernization and import substitution, a transition to domestic equipment – TDMoP Zelax MM116M-24E1 gateways – was proposed. A comparison of the characteristics of the old and new equipment confirmed the advantages of the Russian equivalent in terms of functionality, configuration flexibility, and cost-effectiveness. Based on the comparison results, it was recommended to replace the RAD Optimux-45 equipment with the domestically produced Zelax MM116M-24E1. It proposes a scheme for reorganizing the dedicated network using Zelax equipment, allowing the integration of voice traffic, Ethernet data, and control into a single infrastructure, which is particularly important for ensuring the smooth and safe operation of oil and gas facilities.

Keywords – network, import substitution, digital stream E1, RAD Optimux-45, Zelax MM116M-24E1, SFP, Ethernet, telecommunications.

Information about the authors

Dattsky Alexandr Andreevich (MS) is with ASTU, Astrakhan, Russia, e-mail: sane5852@gmail.com

Pishchin Oleg Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Communications, ASTU, Astrakhan, o.pishin@yandex.ru

References

- [1] O kompanii rad.com URL: <https://www.rad.com/> (data obrashcheniya: 04.12.2025).
- [2] Manual RAD Optimux-45 bestdatasource.com URL: https://bestdatasource.com/rad/data_sheets/op-45l.pdf (data obrashcheniya: 18.11.2025).
- [3] Tekhnicheskaya diagnostika sovremennyh cifrovyyh setej svyazi. Osnovnye principy i tekhnicheskie sredstva izmerenij parametrov peredachi dlya setej PDH, SDH, IP, Ethernet i ATM : uchebnoe posobie / I. I. Vlasov, E. V. Novikov, M. M. Ptichnikov, D. V. Sladkih ; pod redakciej M. M. Ptichnikova. — Moskva : Goryachaya liniya-Telekom, 2012. — 552 s. — ISBN 978-5-9912-0195-7. — Tekst : elektronnyj // Lan': elektronno-bibliotchnaya sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/book/5134> (data obrashcheniya: 21.11.2025). — Rezhim dostupa: dlya avtoriz. pol'zovatelej.
- [4] Izmalkin A.O. O razrabotke laboratornogo kompleksa po issledovaniyu potoka E1 / A.O. Izmalkin // XLIX Ogaryovskie chteniya: materialy nauchnoj konferencii: v 3 chastyah, Saransk, 07–13 dekabrya 2020 goda. Tom CHast' 1. — Saransk: Nacional'nyj issledovatel'skij Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogaryova, 2021. — S. 312-316. — EDN KCOSPY.
- [5] Osnovy proektirovaniya uchastkov transportnoj seti operatorov svyazi: Uchebno-metodicheskoe posobie / O.M. Demidenko, A. A. Sorokin, A. V. Voruev [i dr.]. — Gomel': Gomel'skij gosudarstvennyj universitet im. Franciska Skoriny. — 2020. — 163 s. — ISBN 978-985-577-629-2. — EDN NQTZGW.
- [6] Gordienko V. N. Opticheskie telekommunikacionnye sistemy. Uchebnik dlya vuzov / V.N. Gordienko, V.V. Kruhmalev, A.D. Mochenov, R.M. SHarafutdinov. - Moskva : Goryachaya Liniya-Telekom, 2011. - 368 s. - ISBN 978-5-9912-0146-9.
- [7] O kompanii Zelax.ru URL: <https://www.zelax.ru/company/> (data obrashcheniya: 19.11.2025).
- [8] Zelax MM Tekhnicheskoe opisanie. — URL: https://www.zelax.ru/assets/docs/mm-101_116m_technical_manual.pdf (data obrashcheniya: 19.11.2025).

Системная инженерия и инфокоммуникации

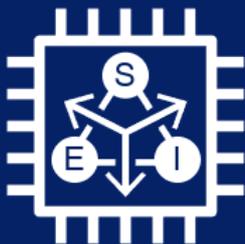
Рецензируемое научное сетевое издание «Системная инженерия и инфокоммуникации» (англ. "Systems engineering and infocommunications регистрационный номер Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г., ISSN: 3034-686X) издается кафедрой «Связь» Астраханского государственного технического университета.

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.



Регистрационный номер: Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.
ISSN: 3034-686X

Учредитель: Кутузов Денис Валерьевич

Сетевое издание размещено по адресу: sys-engine.ru

Электронная почта: d_kutuzov@mail.ru

Телефон: +7(964)88-22-445