

Издательский дом

# МЕДИА ПАБЛИШЕР

## Научный журнал "Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт"

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобразования России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

**Свидетельство о регистрации СМИ:**

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

**Язык публикации:** русский, английский.

**Территория распространения:**

Российская Федерация, зарубежные страны

**Тираж:** 1000 экз.

**Периодичность выхода:** 12 номеров в год

**Стоимость одного экземпляра:** 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

**Предпечатная подготовка:**

ООО "ИД Медиа Паблшер"

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.  
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет

Материалы, опубликованные в журнале — собственность ООО "ИД Медиа Паблшер". Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя

© ООО "ИД Медиа Паблшер", 2026

**Адрес редакции и издателя**

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, стр. 1, офис 323

**e-mail:** t-comm@media-publisher.ru

**Тел.:** +7 (495) 957-77-43

**Адрес типографии**

Москва, ул. Складочная, д. 3, корп. 6

**Индексация журнала:**

Ulrich's Periodicals Directory; RSCI; EBSCO; elibrary.ru (ПИНЦ)  
Google Scholar; CyberLeninka (Open Schience);  
Bielefeld Academic Search Engine (BASE); OCLC WorldCat;  
Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Journal is registered by Federal Service for monitoring compliance with cultural heritage protection law

ISSN 2072-8743 (Online) ISSN 2072-8735 (Print)

**Media Registration Certificate**

PI No. FS77-55956. Date of issue: November 7, 2013

**Publication language:** Russian, English.

**Distribution Territory:** Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved.

No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company

© "Media Publisher", 2026

**Editorial and Publisher Address**

111024, Russia, Moscow, Aviamotornaya str. 8, bloc 1, office 323

**e-mail:** t-comm@media-publisher.ru.

**Tel.:** +7 (495) 957-77-43

### ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР



ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

[www.media-publisher.ru](http://www.media-publisher.ru)

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций

**Учредитель**

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

**Главный редактор**

Тихвинский Валерий Олегович

**Издатель**

Дымкова Светлана Сергеевна  
ds@media-publisher.ru

**Редакционная коллегия**

**Аджемов Артём Сергеевич**

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

**Анютин Александр Павлович**

(д.ф.-м.н., профессор, член программного и оргкомитетов WSEAS), Россия, Мексика

**Бестугин Александр Роеальдович**

(д.т.н., профессор ГУАП), Россия

**Вааль Альберт**

(д.т.н., старший научный сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница на кафедре коммуникационной техники), Германия

**Варламов Олег Витальевич**

(д.т.н., в.н.с. МТУСИ), Россия

**Головачев Юлиус**

(управляющий консультант Detecon International GmbH), Германия

**Гребенников Андрей Викторович**

(Sumitomo Electric Europe), Великобритания

**Данилов Владимир Григорьевич**

(д.ф.-м.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), Россия

**Дулкейтс Эрик**

(д.т.н., старший исполнительный директор корпорации Detecon), Силиконовая долина, США

**Елизаров Андрей Альбертович**

(д.т.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), Россия

**Ибрагимов Байрам**

(д.т.н., профессор Азербайджанского технического университета, АзТУ), Азербайджан

**Корбетт Ровэлл**

(д.т.н., директор по исследованиям в научно-исследовательском центре China Mobile Research Institute, профессор университета Назарбаева), Гон-Конг (Китай), США

**Кузовкова Татьяна Алексеевна**

(д.э.н., декан экономического факультета МТУСИ), Россия

**Лазарева Галина Геннадьевна**

(член-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор РАН, РУДН), Россия

**Лернер Илья Михайлович**

(д.т.н., КНИТУ-КАИ), Россия

**Ныркв Анатолий Павлович**

(д.т.н., профессор, ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова), Россия

**Омельянов Георгий Александрович**

(д.ф.-м.н., Университет де Сонора, факультет математики, Эрмосильо), Мексика

**Самойлов Александр Георгиевич**

(д.т.н., профессор Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых), Россия

**Сысоев Николай Николаевич**

(д.ф.-м.н., декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), Россия

**Чиров Денис Сергеевич**

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

**Шаврин Сергей Сергеевич**

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

**Шарп Майкл**

(д.э.н., Европейский институт стандартизации – ETSI), Великобритания

**Яшина Марина Викторовна**

(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

**Ненашев В.А., Ненашев С.А.**

Автоматическое обнаружение водных каналов по данным воздушного лидара на основе методов технического зрения

4

**Варламов О.В.**

Способы построения функциональных узлов ШИМ модулятора для усилителя с раздельным усилением

12

## СВЯЗЬ

**Савотченко С.Е.**

Аналитические решения в моделях градиентных оптических волокон

23

## ТРАНСПОРТ

**Ефанов Д.В., Елина Е.И., Кашталинский А.С.**

Интеграция систем прогнозирования временных параметров работы системы ограждения на железнодорожных переездах с интеллектуальными транспортными системами на автомобильных дорогах

31

**Плотников П.В., Тамбовцев Г.И., Владыко А.Г.**

Система имитационного моделирования ИТС на базе V2X

42

## ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

## ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

**Безумнов Д.Н., Чиров Д.С.**

Оценка плотности препятствия по измерениям радиолокационного канала системы технического зрения наземного робототехнического комплекса

55

## ТРАНСПОРТ

**Ватин Н.И., Терентьев А.В., Подгорный А.В., Талдыкин Д.С.**

Разработка прогнозирующей вычислительной модели для тягово-динамического анализа сочлененных автотранспортных средств

65

# CONTENT

## ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Nenashev V.A., Nenashev S.A.**  
Automatic detection of water channels based on aerial lidar data based on technical vision methods 4
- Varlamov O.V.**  
Amplifier with separate components amplification envelope path PWM modulator functional units constructing methods 12

## COMMUNICATIONS

- Savotchenko S.E.**  
Analytical solutions in the models of the graded-index optical fibers 23

## TRANSPORT

- Efanov D.V., Yelina Y.I., Kashtalinskiy A.S.**  
Integration of systems for forecasting the temporal parameters of the operation of protective devices at railway crossings with intelligent transport systems on city roads 31
- Plotnikov P.V., Tambovtsev G.I., Vladyko A.G.**  
V2X-based ITS simulation system 42

## PUBLICATIONS IN ENGLISH

## ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Bezumnov D.N., Chirov D.S.**  
Obstacle density estimation according from the radar channel measurements to the technical vision system of ground-based robotic complex 55

## TRANSPORT

- Vatin N.I., Terentyev A.V., Podgorny A.V., Taldykin D.S.**  
Development of a predictive computational model for traction-dynamic analysis of articulated vehicles 65

# T - C o m m

Telecommunications and transport

Volume 20. No. 2-2026

Release date: 20.02.2026

The journal is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses.

**Founder:** "Media Publisher", Ltd.

**Publisher:** Svetlana S. Dymkova  
ds@media-publisher.ru

**Editor in Chief:** Dr. Valery O. Tikhvinskiy

## Editorial board

**Artem S. Adzhemov**  
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

**Alexander P. Anyutin**  
Doctor of sciences, Professor, member of the program and organizing committee WSEAS, Russia, Mexico

**Aleksandr R. Bestugin**  
Doctor of sciences, Professor SUAI, Russia

**Corbett Rowell**  
Full Professor: Electronic & Electrical Engineering  
Nazarbayev University, Hong Kong (China), USA

**Denis S. Chirov**  
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Vladimir G. Danilov**  
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

**Eric Dulkeyts**  
Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, USA

**Julius Golovachyov**  
Managing Consultant Detecon International GmbH, Germany

**Andrey Grebennikov**  
Ph.D., Sumitomo Electric Europe, United Kingdom

**Bayram Ibrahimov**  
Ph.D., Professor of Azerbaijan Technical University (AzTU), Azerbaijan

**Tatyana A. Kuzovkova**  
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Galina G. Lazareva**  
Corresponding Member, RAS, Doctor of sciences, Professor RAS, RUDN, Russia

**Ilya M. Lerner**  
Doctor of sciences, KNRTU-KAI, Russia

**Anatoliy P. Nyrkov**  
Doctor of sciences, Professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russia

**Georgii A. Omel'yanov**  
Doctor of sciences, Universidad de Sonora, Department of Mathematics, Hermosillo, Mexico

**Alexander G. Samoilov**  
Doctor of sciences, VLSU, Russia

**Michael Sharpe**  
PhD, European Standards Institute – ETSI, United Kingdom

**Sergey S. Shavrin**  
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Nikolai N. Sysoev**  
Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics of Moscow State University Lomonosov, Russia

**Oleg V. Varlamov**  
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Albert Waal**  
Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz at the Department of Communications Technology, Germany

**Marina V. Yashina**  
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

**Andrey A. Yelizarov**  
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

[www.media-publisher.ru](http://www.media-publisher.ru)

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ВОДНЫХ КАНАЛОВ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛИДАРА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-4-11

Manuscript received 10 December 2025;  
Accepted 175 February 2026

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 "Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".*

**Ненашев Вадим Александрович,**  
ГУАП, Санкт-Петербург, Россия,  
[nenashev@guap.ru](mailto:nenashev@guap.ru)

**Ненашев Сергей Александрович,**  
ГУАП, Санкт-Петербург, Россия,  
[nenashev\\_sergey178@mail.ru](mailto:nenashev_sergey178@mail.ru)

**Ключевые слова:** воздушное лазерное сканирование, цифровые модели рельефа, обнаружение водных каналов, автономная навигация, техническое зрение

В задачах автономной навигации малых летательных аппаратов и наземных робототехнических платформ требуется формирование семантической модели местности, включающей выделение препятствий и зон риска. В природных и сельскохозяйственных ландшафтах водные каналы и водотоки являются критически важными объектами, поскольку задают границы проходимости, ограничения при планировании маршрутов и условия выбора площадок аварийной посадки. Традиционные подходы, основанные на потоковых алгоритмах по цифровым моделям рельефа, демонстрируют снижение устойчивости в условиях равнинного рельефа и слабых высотных градиентов, а также при частичном экранировании каналов растительностью. Воздушное лазерное сканирование обеспечивает получение плотных облаков точек и позволяет наблюдать элементы микрорельефа, однако существующие методы фильтрации "земля/не земля" и выделения русловых форм часто требуют настройки параметров под конкретный ландшафт и не гарантируют стабильность результата. Цель исследования – разработать методику автоматизированного обнаружения водных каналов по данным воздушного лидара, обеспечивающую формирование навигационно значимых параметров на цифровой карте местности, а именно осевой линии канала и границ берегов, необходимых для последующего внедрения в систему автономной навигации. В работе применяется робастное выделение земной поверхности методом RANSAC с локально-адаптивной статистической калибровкой порогов, восстановление цифровой модели рельефа с использованием сглаживания/интерполяции методом Безье, вычисление дифференциально-геометрических характеристик поверхности на основе первой и второй фундаментальных форм и определение главных кривизин, классификацию типов рельефа с выделением долинообразных структур, геометрическую верификацию гипотез каналов по поперечным профилям (ширина, глубина, площадь сечения). В данной работе разработана методика выделения водных каналов, демонстрирующей высокую точность классификации устойчивость к сложным условиям равнинной местности и плотной растительности. Для методики была разработана программно-алгоритмическая система на языке Python и выполнено тестирование на полевых данных воздушного лазерного сканирования, полученных бортовым лидаром DJI Zenmuse L1 на платформе DJI Matrice 300 RTK. Показана работоспособность методики на участках с различным типом растительности и характером русловых форм; получены осевые линии каналов и границы берегов/бровок. Предложенная методика обеспечивает автоматическое формирование на цифровой карте местности осевых линий, границ берегов/бровок. Эти данные позволяют в системах автономной навигации формировать карты зон риска при планирования безопасных траекторий (в том числе при выборе зон посадки/аварийной посадки МЛА). Методика позволит регулярно и автоматически обновлять навигационные карты по данным воздушного лидара.

## Информация об авторах:

**Ненашев Вадим Александрович**, д.т.н., доцент, заведующий лабораторией машинного обучения проектно-технологического офиса инженерной школы, доцент кафедры "Конструирования и технологий электронных и лазерных средств" ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

**Ненашев Сергей Александрович**, заведующий лабораторией промышленной электроники проектно-технологического офиса инженерной школы, младший научный сотрудник кафедры "Конструирования и технологий электронных и лазерных средств" ГУАП, аспирант ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

## Для цитирования:

Ненашев В.А., Ненашев С.А. Автоматическое обнаружение водных каналов по данным воздушного лидара на основе методов технического зрения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 4-11.

## For citation:

V.A. Nenashev, S.A. Nenashev, "Automatic detection of water channels based on aerial lidar data based on technical vision methods," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 2, pp. 4-11. (in Russian)

## Введение

Автономная навигация малых летательных аппаратов (МЛА) и наземных робототехнических комплексов вне подготовленной инфраструктуры требует построения достоверной семантической модели местности: выделения препятствий, границ безопасной зоны движения, потенциально опасных участков (размывы, овраги, канавы, водные преграды), а также устойчивых ориентиров для привязки и коррекции траектории [1]. В природных и сельскохозяйственных ландшафтах одной из наиболее критичных категорий объектов являются водные каналы и водотоки (естественные и искусственные). Они одновременно выступают физическими барьерами и зонами риска для наземных платформ, ограничениями и запретными зонами при выборе аварийной площадки посадки МЛА, структурными ориентирами для построения карты и сопоставления с априорной геоинформацией [2].

Классические методы выделения дренажной сети и каналов обычно сформированы на анализе цифровой модели рельефа (ЦМР) и потоковых алгоритмах (направление/накопление стока), предполагающих движение воды по направлению наибольшего уклона [2]. В навигационных системах эти подходы часто оказываются недостаточно устойчивыми по двум причинам. Во-первых, на равнинных территориях с малыми высотными градиентами ошибки ЦМР, шумы интерполяции и антропогенные микронеровности приводят к ложным водосборным структурам и разрывам сети. Во-вторых, для автономных систем важно обнаруживать не только “гидрологическую” сеть, но и геометрически выраженную форму препятствия (берега, бровки, тальвег, ширина/глубина), поскольку именно эти параметры используются для оценки проходимости, планирования траектории и назначения зон безопасности.

Применение метода воздушного лазерного сканирования (ВЛС) бортовым лидаром обеспечивает формирование плотных трехмерных облаков точек и частичное сканирование сквозь растительный полог. При плотностях порядка 8-15 точек/м<sup>2</sup> становятся наблюдаемыми элементы микрорельефа, включая узкие канавы и бровки каналов. Однако практическое применение лидарных данных в автономной навигации осложняется необходимостью надежно отделять отражения от грунта от растительности и других надземных объектов, сохраняя при этом микрорельеф, критичный для распознавания каналов [3, 4]. Типовые методы фильтром «земля»/«не-земля» требуют настройки под конкретную сцену и часто либо “срезают” слабовыраженные русловые формы, либо оставляют артефакты низкой растительности, порождающие ложные долины. Для автономной навигации это приводит к ошибкам карты: ложным запретам движения либо, наоборот, к недетектированным препятствиям.

Целью настоящей работы является разработка методики автоматизированного обнаружения водных каналов на цифровой карте, формируемой по данным воздушного лазерного сканирования бортовым лидаром, установленным на МЛА и работающим на высотах порядка 100-400 м. Методика ориентирована на формирование осевой линии канала, границ берегов/бровок, пригодных для дальнейшего внедрения интеграции в системы автономной навигации.

## Анализ методов классификации рельефа и выделению водных объектов в навигационных задачах

При анализе методов выделения водных границ и каналов можно условно разделить на две группы: прямые (обнаружение водной поверхности) и косвенные (обнаружение русловой формы как геометрическую форму на ЦМР, независимо от наличия воды).

1. Потоковые алгоритмы на ЦМР ( $D8/D\infty$ , накопление стока). Класс методов, основанных на моделировании направления и накопления стока на ЦМР (например, схемы  $D8$  и  $D\infty$ ), широко применяется для автоматического построения дренажной сети и определения тальвегов. Основным преимуществом потоковых алгоритмов является интерпретируемость результата и возможность получения связной сети линий стока. Вместе с тем для навигационных систем ограничением является высокая чувствительность к качеству исходной ЦМР и к малым высотным градиентам, характерным для равнинных территорий. В таких условиях шумы интерполяции и артефакты восстановления поверхности могут приводить к ложным направлениям стока, разрывам сети и смещению извлекаемых осевых линий относительно реальных бровок и берегов. В результате формально корректная с точки зрения потоковой модели сеть не всегда обеспечивает точность обнаружения препятствий.

2. Методы классификации форм рельефа по геоморфометрическим признакам. Другой распространенный метод связан с использованием геоморфометрических производных ЦМР: уклона, экспозиции, профильной и плановой кривизн, показателей вогнутости/выпуклости, шероховатости и локальной вариативности высот. Эти признаки удобны для построения карт стоимости движения (cost map), где каждому элементу поверхности сопоставляется «штраф» за прохождение, и для первичной сегментации форм рельефа. Однако при вычислении на зашумленной ЦМР геоморфометрические производные могут демонстрировать повышенную вариативность на масштабе дискретизации, что приводит к пространственной фрагментации классов и нестабильности границ между «проходимыми» и «непроходимыми» областями. Для автономной навигации данное свойство нежелательно, поскольку вызывает локальные ложные препятствия и неустойчивое поведение планировщика траектории при последовательных обновлениях карты.

3. Методы дифференциально-геометрического анализа по главным кривизнам. Перспективным направлением для выделения русловых форм является анализ локальной формы поверхности на основе коэффициентов главных кривизн, вычисляемых по аналитическому или локально-аппроксимированному представлению  $z(x,y)$ .

Преимуществом данного подхода является ориентационная инвариантность, где долинообразные структуры выявляются независимо от направления их простираения в плане. Для каналов в равнинной местности типична геометрия, при которой вдоль оси канала поверхность близка к планарной, а в поперечном направлении выражена вогнутость. Для задач навигации наличие устойчивой поперечной вогнутости является информативным признаком потенциального барьера и границы проходимости. В отличие от потоковых методов, данный подход не опирается на глобальное направление

уклона и сохраняет работоспособность при слабовыраженных градиентах, при условии робастного восстановления ЦМР и контроля сглаживания.

4. Семантической сегментации водных объектов и прибрежных зон методами машинного обучения по многоканальным признакам. В данном классе методов задача формулируется как классификация пикселей в классы «вода», «берег/прибрежная зона», «суша», «растительность» с использованием признаков, полученных из лидара и оптической камеры. В качестве входных данных применяются многоканальные карты (например, высота ЦМР, уклон, кривизны, шероховатость, плотность точек, интенсивность, текстурные признаки оптического изображения), а решение строится на основе обучаемых моделей (градиентный бустинг, случайный лес, либо сверточные сети для сегментации). Результатом является маска водных объектов и прибрежных зон, пригодная для построения навигационных параметров для последующего извлечения границ и осевых линий водного канала.

Таким образом, методы обнаружения воды по оптическим признакам не всегда обеспечивают непрерывное и однозначное выделение водной поверхности, а методы, опирающиеся только на потоковые модели или отдельные геоморфометрические производные, не гарантируют корректной локализации берегов/бровок в условиях равнинного рельефа и шумов ЦМР. Кроме того, обучаемые методы семантической сегментации требуют репрезентативной обучающей выборки и контроля при применении новые сцены, что затрудняет их применение как универсального решения в составе бортовых систем.

В связи с указанными особенностями представляется целесообразным разработать собственную методику автоматического обнаружения речных каналов по облаку точек, сформированному бортовым лидаром.

### 3. Методика обнаружения речных каналов на облаке данных, сформированных бортовым лидаром

Для достижения поставленной цели была предложена методика автоматического обнаружения речных каналов на облаке точек, описанная в схеме на рисунке 1.

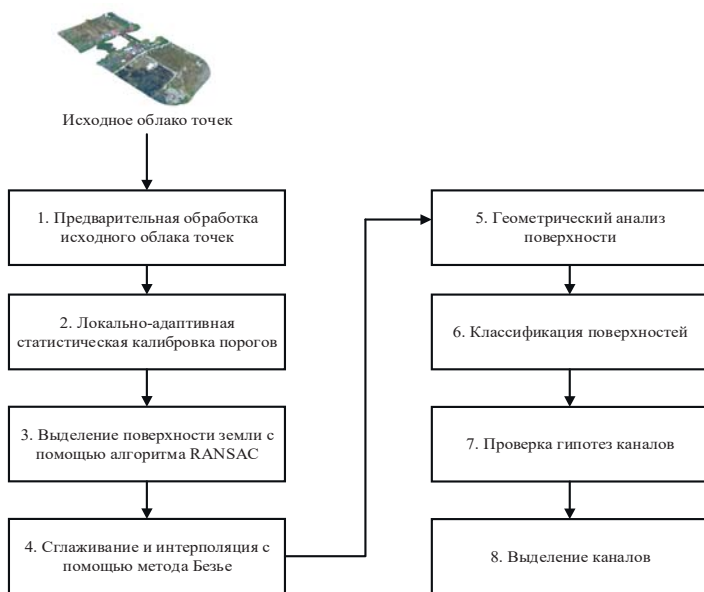


Рис. 1. Схема, описывающая методику обнаружения речных каналов на облаке точек

Представленная на схеме (рис. 1) методика состоит из последовательных 8 шагов:

Шаг 1. Предварительная обработка исходного облака точек.

Шаг 2. Локально-адаптивная статистическая калибровка порогов.

Шаг 3. Выделение поверхности земли с помощью алгоритма RANSAC.

Шаг 4. Сглаживание и интерполяция с помощью метода Безье.

Шаг 5. Геометрический анализ поверхности.

Шаг 6. Классификация поверхностей.

Шаг 7. Проверка гипотез каналов.

Шаг 8. Выделение каналов.

Далее рассмотрим каждый шаг подробнее.

#### Шаг 1. Предварительная обработка исходного облака точек

Предварительная обработка лидарных данных начинается с работы над исходным облаком точек (рис. 2), где каждая точка описывается координатами  $(x, y, z)$  и интенсивностью  $I$ . На данном шаге удаляются выбросы с помощью статистических методов, таких как медианное абсолютное отклонение и межквартильный размах, чтобы повысить устойчивость к шуму [5, 6].

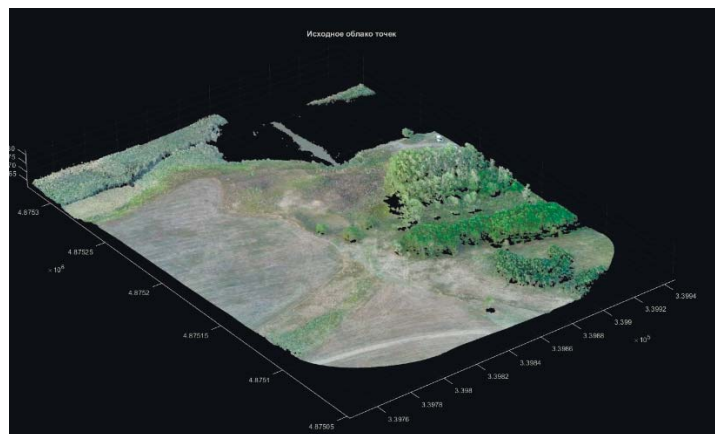


Рис. 2. Исходное облако точек с водным ресурсом

К тому же, на данном шаге нормализуется интенсивность с учетом расстояния до объекта, для дальнейшей фильтрации без искажений от вариаций сигнала.

#### Шаг 2. Локально-адаптивная статистическая калибровка порогов

Вводится блок локально-адаптивной статистической калибровки порогов перед RANSAC, поскольку фиксированный порог невязки  $\delta$  ухудшает переносимость между сценами с разной плотностью точек и уровнем растительности. Блок выводит адаптивный  $\delta = c \cdot MAD(\epsilon)$  из медианной абсолютной девиации невязок по предварительной квадратичной аппроксимации в локальном окне каждой ячейки сетки, где  $c \approx 2.5$  обеспечивает согласование с нормальным распределением. Полученный порог стабилизирует выделение земных точек и устраняет ручную настройку, повышая воспроизводимость геометрического анализа. Локальные  $\delta$  передаются в шаг 3, стабилизируя выделение земли и повышая переносимость.

**Шаг 3. Выделение поверхности земли с помощью алгоритма RANSAC.**

После шага 2 выделяется земная поверхности с помощью алгоритма RANSAC для отделения земли от растительности [7-10]. На основе адаптивных порогов  $\delta$  в каждой ячейке регулярной сетки размером  $2 \times 2$  метра, независимо строят локальную квадратичную полиномиальную модель рельефа:

$$z(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6xy \quad (1)$$

Коэффициенты  $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$  определяются методом наименьших квадратов для случайно выбранного подмножества точек в окрестности радиуса  $r$  (2-5 метров). Точка классифицируется как принадлежащая земной поверхности, при одновременном выполнении трех условий:

- 1) остаточное расстояние до модели не превышает пороговое значение  $\delta$  (0.1-0.5 м, отсекает кусты);
- 2) локальный наклон поверхности  $|\nabla z| < \tan(\alpha_{\max})$ , около  $5-15^\circ$  (исключает крутые склоны);
- 3) доля инлайеров в окрестности превышает минимальное значение  $\rho_{\min}$ .

Для обеспечения непрерывности поверхности используются ограничения на соседние участки. Разность высот и углы между нормальными поверхностями в перекрывающихся областях не должны превышать заданных пороговых значений. Алгоритм выполняется итеративно с постепенным ослаблением критериев от строгих к более мягким для покрытия сложных участков рельефа [11].

**Шаг 4. Сглаживание поверхности с помощью метода Безье**

Сглаживание поверхности итеративным методом Безье применяется для заполнения пробелов после метода RANSAC. Поверхность Безье определяется набором контрольных точек и обеспечивает гладкое восстановление рельефа с контролируемой степенью сглаживания.

Параметры интерполяции адаптируются к локальным условиям рельефа. Расстояние между контрольными точками составляет 1,5 м при коэффициенте гладкости 5, что обеспечивает сохранение узких каналов. В первых 3-4 итерациях пороговое расстояние для включения точек составляет 30 см, затем увеличивается до 40 см для захвата оставшихся точек поверхности [12-14].

**Шаг 5. Геометрический анализ поверхности.**

Геометрический анализ поверхности выполняется после получения цифровой модели рельефа (ЦМР) из предыдущих шагов и представляет собой вычисление дифференциальных характеристик поверхности для каждой ячейки сетки  $s \times s$ . Этот анализ опирается на две фундаментальные формы поверхности, определённые в классической дифференциальной геометрии, чтобы количественно описать локальную форму рельефа – его метрику и кривизну – без предположений о направлении уклона или ориентации каналов.

Сначала вычисляют первую фундаментальную форму, которая задаёт метрические свойства поверхности в параметрическом виде

$$I = E dx^2 + 2F dx dy + G dy^2 \quad (2)$$

Коэффициенты этой формы получаются из частных производных модели  $z(x, y)$ , полученной на шаге RANSAC:

$$E = 1 + (\partial z / \partial x)^2 = 1 + a_2^2 \quad (3)$$

где  $\partial z / \partial x = a_2 + 2a_4x + a_6y$ , но для упрощения используют приближения на основе коэффициентов полинома  $E = 1 + a_2^2$  аналогично  $F = (\partial z / \partial x)(\partial z / \partial y) = a_2a_3$  и  $G = 1 + (\partial z / \partial y)^2 = 1 + a_3^2$ .

Эта форма описывает, как расстояния и углы искажаются на поверхности, позволяя строить матрицу  $A$  для дальнейших расчётов.

Затем определяют вторую фундаментальную форму

$$II = edx^2 + 2fdxdy + gdy^2 \quad (4)$$

которая характеризует кривизну путём сравнения поверхности с касательной плоскостью. Коэффициенты вычисляются как

$$e = \frac{2a_4}{\sqrt{(1+a_2^2+a_3^2)}} \quad (5)$$

для кривизны по  $x$ ,

$$f = \frac{a_6}{\sqrt{(1+a_2^2+a_3^2)}} \quad (6)$$

для смешанной компоненты и

$$g = \frac{2a_5}{\sqrt{(1+a_2^2+a_3^2)}} \quad (7)$$

для кривизны по  $y$ , где знаменатель нормализует вторые производные  $\partial^2 z / \partial x^2 = 2a_4$  и т.д., учитывая наклон поверхности через градиент  $p^2 + q^2$  с  $p = \partial z / \partial x \approx a_2$ ,  $q = \partial z / \partial y \approx a_3$ .

На основе этих форм формируют матрицы

$$A = [[E, F], [F, G]] \text{ и } B = [[e, f], [f, g]], \quad (8)$$

после чего главные кривизны  $k_1$  и  $k_2$  находят как собственные значения обобщённой задачи на собственные векторы  $(B - kA)V = 0$ , решая характеристическое уравнение  $\det(B - kA) = 0$ . Это даёт две ортогональные кривизны: максимальную и минимальную в главных направлениях. Дополнительно рассчитывают гауссову кривизну  $K = k_1 k_2$  (положительная для эллиптических точек, отрицательная для гиперболических долин) и среднюю кривизну  $H = (k_1 + k_2)/2$  (положительная для выпуклостей, отрицательная для вогнутостей).

Все вычисления проводят локально в каждой ячейке сетки, используя коэффициенты полинома  $z(x, y)$  как аналитические производные, что обеспечивает эффективность на больших объёмах лидарных данных (8-15 точек/м<sup>2</sup>). Такой подход позволяет независимо от глобального уклона выявлять долинообразные структуры, где типичны  $k_1 \approx 0$  (планарность вдоль канала) и  $k_2 < 0$  (вогнутость поперёк), что критично для равнинных лесостепных зон [15].

**Шаг 6. Классификация типов поверхности**

Классификация типов поверхности опирается на значения главных кривизн, где долинообразные участки определяют

по условию  $k_1 \approx 0$  и  $k_2 < 0$ , указывающему на цилиндрическую вогнутость в одном направлении. Дополнительно вычисляются гауссова  $K = k_1 k_2$  и средняя  $H = (k_1 + k_2)/2$  кривизны для уточнения классификации [16-18].

Классификация всех типов поверхности можно описать следующим образом:

- плоская поверхность (планарная):  $k_1 \approx 0, k_2 \approx 0, K \approx 0, H \approx 0$ . Характерно для равнин, болот, аэродромов;
- холм/вершина (эллиптическая выпуклость):  $k_1 > 0, k_2 > 0, K > 0, H > 0$ . Положительные кривизны в обоих направлениях, как купол;
- гребень/седло (гиперболическая выпуклость):  $k_1 > 0, k_2 < 0, |k_1| \approx |k_2|, K < 0, H \approx 0$ . Выпуклость вдоль гребня, вогнутость поперек;
- склон (цилиндрическая): одна кривизна  $\approx 0$ , другая малая. Промежуточный класс между плоскостью и гребнем;
- долина/желоб (гиперболическая вогнутость):  $k_1 \approx 0, k_2 < 0, K < 0, H < 0$ ;
- впадина/кратер (эллиптическая вогнутость):  $k_1 < 0, k_2 < 0, K > 0, H < 0$ .

### Шаг 7. Проверка гипотез каналов

Потенциальные местоположения каналов определяются случайным выбором из ячеек, классифицированных как "долина". Для каждой гипотезы строится поперечное сечение в направлении максимальной кривизны и анализируется его геометрия:

1. Определяется точка минимальной высоты (талвег) в сечении;
2. Находятся максимальные отметки по обе стороны от талвега;
3. Вычисляется глубина канала  $d$  как разность между минимальной максимальной отметкой и высотой талвега.
4. Определяется ширина канала  $w$  по соответствующему местоположению на противоположной стороне гипотеза принимается как действительный канал при выполнении критериев:

- отношение ширины к глубине

$$w/d < 40 \text{ м/м} \quad (9)$$

- глубина канала

$$d > 0,3 \text{ м} \quad (10)$$

- площадь сечения

$$A = wd > 5,2 \text{ м}^2 \quad (11)$$

### Шаг 8. Выделение канала

От каждой подтвержденной точки канала выполняется двустороннее отслеживание в направлении минимальной кривизны. Направление отслеживания перпендикулярно к поперечному сечению и определяется собственным вектором, соответствующим минимальной кривизне [19, 20].

На каждом шаге отслеживания строится новое поперечное сечение и проверяются критерии канала. Процесс продолжается до нарушения геометрических критериев канала или достижения границ данных. Обнаруженные сегменты каналов исключаются из дальнейшего поиска гипотез.

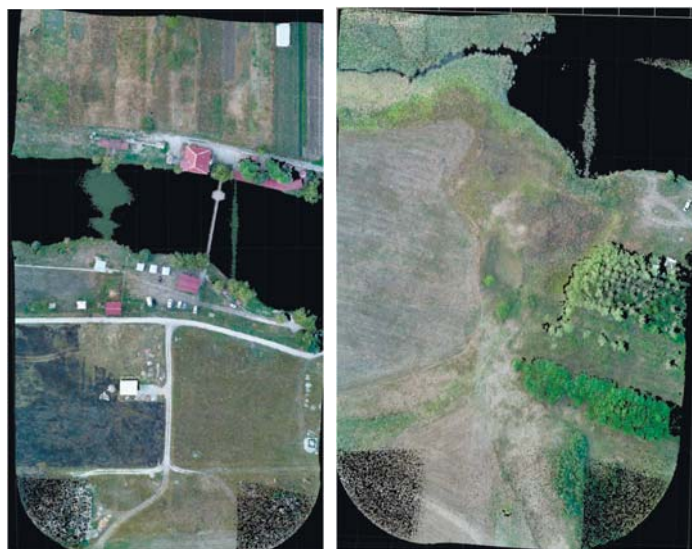
Таким образом, последовательность обработки от исходного облака точек до построения сети речных каналов завершает разработанную методику. Для подтверждения ее эффективности на практике и оценки устойчивости к реальным условиям съемки проведено тестирование на полевых данных, собранных бортовым лидаром.

### Тестирование предложенной методики на «полевых» данных

Для тестирования предложенной методики автоматического обнаружения водных каналов по данным воздушного лазерного сканирования создана программно-алгоритмическая система на языке Python. Входными данными являлось трехмерное облако точек  $(x, y, z)$  с атрибутом интенсивности  $I$ , полученное при съемке бортовым лидаром DJI Zenmuse L1, установленным на беспилотной платформе DJI Matrice 300 RTK.

Тестирование методики проведено на двух тестовых участках, различающихся характером рельефа и типом растительного покрова. Участок 1 (рис. 3а) включает искусственные каналы с выраженной геометрией русла при умеренной растительности. Участок 2 (рис. 3б) характеризуется природными водотоками, частично экранированными камышовой растительностью, что усложняет выделение русловых форм.

Следует отметить, что водная поверхность в лидарных данных часто сопровождается отсутствием устойчивых возвышений и локальными «провалами» по дальности вследствие зеркального отражения и переотражений лазерного излучения, на цифровой карте местности такие области отображаются темным цветом (рис. 3) [21-23].

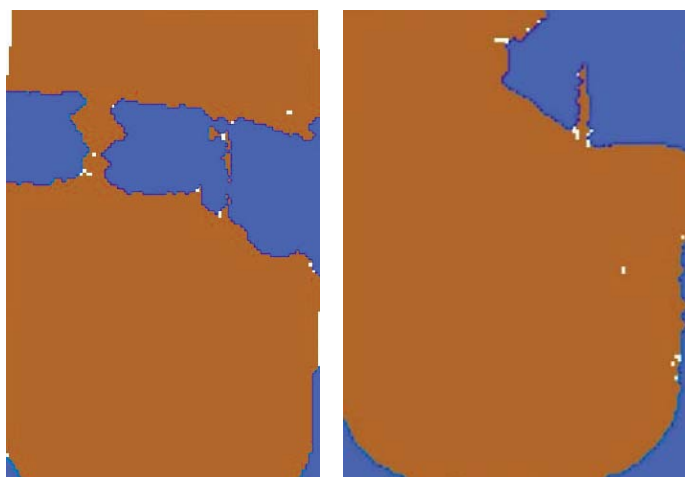


а) первый участок

б) второй участок

Рис. 3. Исходное облако точек

По результатам обработки для участка с водной поверхностью оценен уровень воды, который составил 569,13 м над уровнем моря. Выделенная водной поверхности составила 18,2% площади исследуемой территории (рис. 4а).

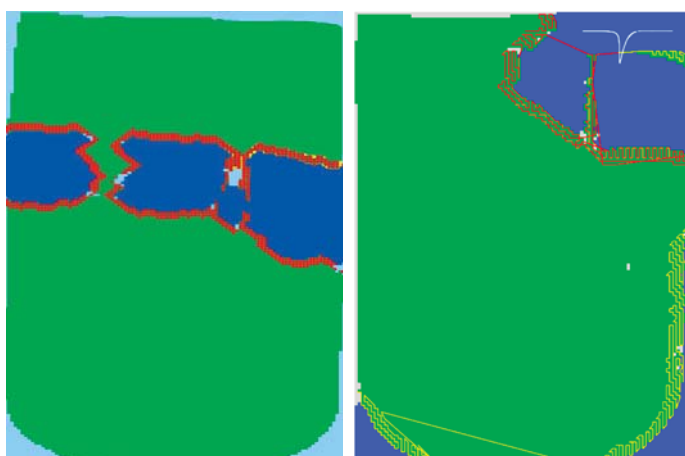


а) первый участок

б) второй участок

Рис. 4. Обнаружение водной поверхности в облаке точек

Для выделенного водного объекта выполнен последующий анализ русловой формы с оценкой береговых линий и параметров канала. Длина канала по центральной линии составила 784,5 м, средняя ширина – 140,5 м.



а) первый участок

б) второй участок

Рис. 5. Обнаружение речного канала

На рисунке 5 представлена цифровая модель рельефа, где границы канала показаны красным цветом, водная поверхность – синим, неопределенный класс – белым. Дополнительно исследовано влияние параметров сглаживания/интерполяции методом Безье на качество восстановления микрорельефа. При коэффициенте гладкости 2 и расстоянии между контрольными точками 1,5 м поверхность сохраняет мелко-масштабные детали, однако наблюдаются артефакты, обусловленные остаточными отражениями от низкой растительности.

Увеличение коэффициента гладкости до 10 приводит к эффективному подавлению шумов, но может сопровождаться потерей узких каналов. В качестве компромиссных, обеспечивающих устойчивое восстановление рельефа при сохранении каналов шириной более 3-4 м, выбраны параметры: расстояние между контрольными точками 1,5 м, коэффициент гладкости 5.

## Заключение

Предложенная методика автоматического обнаружения водных каналов по данным воздушного лидара предназначена для формирования на цифровой карте местности осевой линии канала и границ берегов. Методика показала преимущество в условиях равнинного рельефа и плотной растительности, где традиционные потоковые алгоритмы по ЦМР и методы с фиксированными порогами фильтрации демонстрируют недостаточную устойчивость.

Научная новизна работы для задач автономной навигации состоит в том, что локализация каналов выполняется как выявление геометрической формы препятствия на основе дифференциально-геометрических характеристик поверхности (главных кривизн и фундаментальных форм), а достоверность результатов обеспечивается проверкой гипотез по интерпретируемым геометрическим критериям (ширина, глубина и площадь поперечного сечения). Методика позволяет преобразовывать лидарные данные в навигационные параметры, а именно границы препятствий, осевые линии и параметры, необходимые для оценки проходимости и планирования траектории.

Практическая значимость методики заключается в возможности автоматического обновления цифровой карты местности, что повышает безопасность автономных миссий: обеспечивает корректное планирование маршрутов вблизи каналов, исключение потенциально опасных зон посадки над водными преградами и мониторинг изменений русловых форм.

Проведенное тестирование на «полевых» данных подтвердили применимость методики для построения указанных навигационных объектов и ее устойчивость при изменении растительного покрова и параметров микрорельефа.

## Литература

1. Ненашев В.А., Бестугин А.Р., Ненашев С.А. Киришина И.А., Куркова О.П. Контроль наземных объектов на основе нейросетевого распознавания авиационных системах технического зрения // Датчики и системы №2 (274) 2024 С. 57-61 <https://elibrary.ru/item.asp?id=67853940>.
2. Валиев В.С., Иванов Д.В. Градиентный алгоритм семантической сегментации изображений земной поверхности и его использование для выделения границ водных объектов // Российский журнал прикладной экологии. 2025. № 1. С. 19-26.
3. Li B. On enhancing ground surface detection from sparse lidar point cloud // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019. С. 4524-4529.
4. Новиков В.В. Опыт применения воздушного лазерного сканирования на базе БПЛА для исследования средневековых памятников IX - XII вв. На территории Европейской части России // Труды VI (XXII) Всероссийского археологического съезда в Самаре: Труды съезда. В 3-х томах, Самара, 01-02 октября 2020 года. Том III. Самара: Самарский государственный социально-педагогический университет, 2020. С. 177-179.
5. Цай С.С. Использование материалов лидарной съемки участков лесного фонда, полученных с беспилотных летательных аппаратов, для определения углов наклона местности // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (282). С. 30-37.
6. Михеев А.В. Современная технология очистки закрытых дренажных систем // Вестник аграрной науки Дона. 2014. Т. 2. № 26. С. 41-47.

7. Селезнева Е.В. Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. № 2. С. 47-53.
8. Nenashev V.A., Nenashev S.A. Search and Study of Marked Code Structures for a Spatially Distributed System of Small-Sized Airborne Radars. *Sensors* 2023, 23, 6835. <https://doi.org/10.3390/s23156835>.
9. Петрушин А.Ф. и др. Определение местоположения закрытого дренажа с помощью нейросети по данным дистанционного зондирования // Рисоводство. 2024. Т. 23. № 1 (62). С. 88-93.
10. Ненашев В.А. и др. Формирование трехмерных моделей местности на основе лидарной съемки для выявления структурных изменений земной поверхности // Труды МАИ. 2023. № 131.
11. Выстрчил М.Г. и др. Алгоритм выделения точек земной поверхности из данных воздушного лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2024. № 2. С. 2.
12. Сай С.В., Зинкевич А.В. Метод семантической сегментации данных воздушного лазерного сканирования водоохранных зон // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25. № 1. С. 68-77.
13. Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Источники информации о подводном, прибрежном и наземном рельефе и их применение для построения совмещенных моделей рельефа // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 5. С. 55-68.
14. Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Возможные источники информации о подводном и прибрежном рельефах и построение комплексной модели на основе этих данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования земли. 2022. С. 163-166.
15. Сулейменов Б.У., Танирберген С.И. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии: обзор // Почвоведение и агрохимия. 2018. № 2. С. 85-100.
16. Али Б., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. № 4 (119). С. 87-105.
17. Юдин Д.А., Кольцов К.В. Навигация с применением RANSAC фильтрации точечных особенностей // Труды конференции "Графикон-2013". М.: МГУ, 2013. С. 271-274.
18. Ненашев В.А., Рыжов К.Ю., Ненашев С.А. и др. Разработка и исследование интеллектуальной пространственно-распределенной многосенсорной системы мониторинга земной и морской поверхности, реализуемого средствами малой корабельной авиации // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2023. №1. С. 45-56.
19. Медведев А. А. и др. Мультивременной анализ состояния акватории и прибрежной зоны озера севан на основе высокодетальных пространственных данных // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование. 2019. С. 467-471.
20. Ефимов А.И., Колчаев Д.А., Новиков А.И. Итерационный алгоритм совмещения трехмерных облаков точек // Методы и средства обработки и хранения информации. Рязань, РИЦ РГРТУ. 2018. С. 139-142.
21. Антохин Е.А., Залищук А.А., Ненашев В.А., Ненашев С.А. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для классификации зон земной поверхности по оптическим изображениям // Радиотехника, Т. 88. № 8. С. 35-44. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202408-04>.
22. Морев К.И. Метод сопоставления облаков особых точек изображений для задач трекинга, основанный на интуиционистской нечеткой логике // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 293-306.
23. Мсаллам М., Сырямкин В.И. Методика регистрации 3д облаков точек с использованием коррекции плоскостей и корреляции гистограмм // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2023. № 1 (61). С. 73-89.

## AUTOMATIC DETECTION OF WATER CHANNELS BASED ON AERIAL LIDAR DATA ON TECHNICAL VISION METHODS

Vadim A. Nenashev, SUAI, Saint-Petersburg, Russia, [nenashev@guap.ru](mailto:nenashev@guap.ru)  
Sergey A. Nenashev, SUAI, Saint-Petersburg, Russia, [nenashev\\_sergey178@mail.ru](mailto:nenashev_sergey178@mail.ru)

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. FSRF-2023-0003 "Fundamental principles for building interference-proof systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

### Abstract

The tasks of autonomous navigation of small aircraft and ground-based robotic platforms require the formation of a semantic model of the terrain, including the identification of obstacles and risk zones. In natural and agricultural landscapes, water channels and watercourses are critically important objects, since they set the boundaries of passability, restrictions on route planning, and conditions for choosing emergency landing sites. Traditional approaches based on streaming algorithms based on digital terrain models demonstrate reduced stability in conditions of flat terrain and weak elevation gradients, as well as with partial shielding of channels by vegetation. Aerial laser scanning provides dense clouds of dots and allows you to observe microrelief elements, however, existing methods of filtering "ground/not ground" and highlighting channel shapes often require adjusting parameters to a specific landscape and do not guarantee the stability of the result. To develop a methodology for automated detection of water channels based on aerial lidar data, which ensures the formation of navigationally significant parameters on a digital terrain map, namely the centerline of the channel and the boundaries of the banks/brows, necessary for subsequent implementation into the autonomous navigation system. The work uses robust allocation of the earth's surface by the RANSAC method with locally adaptive statistical calibration of thresholds, restoration of a digital relief model using smoothing/interpolation by the Bezier method, calculation of differential geometric characteristics of the surface based on the first and second fundamental shapes and determination of the main curvatures, classification of relief types with the allocation of valley-like structures, geometric verification of hypotheses of channels by cross-section profiles (width, depth, cross-sectional area). In this work, a method for identifying water channels has been developed, demonstrating high classification accuracy and resistance to difficult conditions of flat terrain and dense vegetation. A software and algorithmic system in Python was developed for the technique and field testing was performed on airborne laser scanning data obtained by the DJI Zenmuse L1 onboard lidar on

the DJI Matrice 300 RTK platform. The efficiency of the technique is shown in areas with different types of vegetation and the nature of riverbed forms; the axial lines of channels and the boundaries of banks/brows are obtained. The proposed technique provides for the automatic formation of axial lines and coast/brow boundaries on a digital terrain map. These data will allow autonomous navigation systems to generate maps of risk zones when planning safe trajectories (including when selecting landing/emergency landing zones for UAVs). In addition, the technique will allow for regular and automatic updating of navigation maps based on aerial lidar data.

**Keywords:** laser scanning, digital terrain models, channel detection, surface curvature, RANSAC, drainage networks, hydrology.

## References

- [1] V.A. Nenashev, A.R. Bestugin, S.A. Nenashev, I.A. Kirshina, O.P. Kurkova, "Control of ground objects based on neural network recognition in aviation vision systems," *Sensors and systems*, No. 2 (274). 2024, pp. 57-61 <https://elibrary.ru/item.asp?id=67853940>
- [2] V.S., Valiev, D.V. Ivanov, "Gradient algorithm of semantic segmentation of images of the Earth's surface and its use to distinguish the boundaries of water bodies," *Russian Journal of Applied Ecology*. 2025. No. 1, pp. 19-26.
- [3] B. Li, "On enhancing ground surface detection from sparse lidar point cloud," *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2019, pp. 4524-4529.
- [4] V.V. Novikov, "The experience of using airborne laser scanning based on UAVs to study medieval monuments of the IX - XII centuries. On the territory of the European part of Russia," *Proceedings of the VI (XXII) All-Russian Archaeological Congress in Samara: Proceedings of the Congress*. In 3 volumes, Samara, October 01-02, 2020. Vol. III. Samara: Samara State Socio-Pedagogical University, 2020, pp. 177-179.
- [5] S.S. Tsai, "The use of lidar survey materials of forest plots obtained from unmanned aerial vehicles to determine the angles of inclination of the terrain," *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. 2024. No. 2 (282), pp. 30-37.
- [6] A.V. Mikheev, "Modern technology of cleaning closed drainage systems," *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2014. Vol. 2. No. 26, pp. 41-47.
- [7] E.V. Selezneva, "Application of laser scanning in geomorphological research," *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2013. No. 2, pp. 47-53.
- [8] V.A. Nenashev, S.A. Nenashev, "Search and Study of Marked Code Structures for a Spatially Distributed System of Small-Sized Airborne Radars," *Sensors* 2023, 23, 6835. <https://doi.org/10.3390/s23156835>.
- [9] A.F. Petrushin et al., "Determining the location of a closed drainage using a neural network based on remote sensing data," *Rice farming*. 2024. Vol. 23. No. 1 (62), pp. 88-93.
- [10] V.A. Nenashev et al., "Formation of three-dimensional terrain models based on lidar surveys to identify structural changes in the Earth's surface," *Proceedings of the MAI*. 2023. No. 131.
- [11] M.G. Vystrchil et al., "An algorithm for selecting points on the Earth's surface from aerial laser scanning data," *Geodesy and cartography*. 2024. No. 2, p. 2.
- [12] S.V. Sai, A.V. Zinkevich, "Method of semantic segmentation of aerial laser scanning data of water protection zones," *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025. Vol. 25. No. 1, pp. 68-77.
- [13] A.E. Khmel'nov, A.S. Gachenko, "Sources of information on underwater, coastal and terrestrial relief and their application for constructing combined relief models," *Computing technologies*. 2022. Vol. 27. No. 5, pp. 55-68.
- [14] A.E. Khmel'nov, A.S. Gachenko, "Possible sources of information on underwater and coastal reliefs and the construction of an integrated model based on these data," *Regional problems of remote sensing of the Earth*. 2022, pp. 163-166.
- [15] B.U. Suleimenov, S.I. Tanirbergenov, "Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in precision agriculture: an overview," *Soil science and agrochemistry*. 2018. No. 2, pp. 85-100.
- [16] B. Ali, R.N. Sadekov, V.V. Tsodokova, "Algorithms for navigation of unmanned aerial vehicles using vision systems," *Gyroscopy and navigation*. 2022. Vol. 30. No. 4 (119), pp. 87-105.
- [17] D.A. Yudin, K.V. Koltsov, "Navigation using RANSAC filtering of point features," *Proceedings of the Graphicon-2013 conference*. Moscow: MSU, 2013, pp. 271-274.
- [18] V.A. Nenashev, K.Yu. Ryzhov, S.A. Nenashev et al., "Development and research of an intelligent spatially distributed multisensory monitoring system for the earth and sea surface, implemented by means of small ship aircraft," *Tr. Krylov State Scientific Center*. 2023. No. 1, pp. 45-56.
- [19] A.A. Medvedev et al., "Multi-time analysis of the condition of the water area and the coastal zone of Lake Sevan based on highly detailed spatial data," *Geodesy, cartography, geoinformatics, and cadastre. Science and education*. 2019, pp. 467-471.
- [20] A.I. Efimov, D.A. Kolchaev, A.I. Novikov, "Iterative algorithm for combining three-dimensional point clouds," *Methods and means of information processing and storage*. Ryazan, RIC RGRU. 2018, pp. 139-142.
- [21] E.A. Antokhin, A.A. Zalishchuk, V.A. Nenashev, S.A. Nenashev, "Comparative analysis of neural network models for classifying zones of the Earth's surface by optical images," *Radio Engineering*, Vol. 88. No. 8, pp. 35-44. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202408-04>.
- [22] K.I. Morev, "A method for matching clouds of singular image points for tracking tasks based on intuitionistic fuzzy logic," *Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2019. No. 1 (203), pp. 293-306.
- [23] M. Msallam, V.I. Syryamkin, "A technique for registering 3D point clouds using plane correction and histogram correlation," *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2023. No. 1 (61), pp. 73-89.

## Information about authors:

**Vadim A. Nenashev**, Ph.D. (Tech.), Head of the machine learning laboratory of the SUAI engineering school, associate professor of the department of "Design and technology of electronic and laser devices" of SUAI, Saint-Petersburg, Russia

**Sergey A. Nenashev**, Head of the Industrial Electronics Laboratory of the Design and Technology Office of the Engineering School of SUAI, Junior Researcher at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment at SUAI, Postgraduate Student at SUAI, Saint-Petersburg, Russia

# СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ШИМ МОДУЛЯТОРА ДЛЯ УСИЛИТЕЛЯ С РАЗДЕЛЬНЫМ УСИЛЕНИЕМ СОСТАВЛЯЮЩИХ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-12-22

Manuscript received 10 December 2025;

Accepted 12 February 2026

Варламов Олег Витальевич,  
Московский технический университет связи и информатики,  
Москва, Россия, [vov@mtuci.ru](mailto:vov@mtuci.ru)

**Ключевые слова:** усилитель мощности, раздельное усиление, ШИМ модулятор, отрицательная обратная связь по току, относительная задержка составляющих, нелинейные искажения

В настоящей статье приводятся результаты дополнительных исследований, не нашедших отражения ранее, но имеющих существенное значение для реализации усилителя мощности с раздельным усилением составляющих (УМРС) с высокими качественными и энергетическими характеристиками, относящиеся к особенностям построения низкочастотного (НЧ) тракта (или тракта огибающей) УМРС. В частности, для стабилизации параметров усилителя в условиях неизменно присутствующего на практике рассогласования антенны, обосновано применение в модуляционном тракте двухсторонне нагруженного ФНЧ с плавным переходом. Для практической реализации данного решения предложено использование в модуляционном тракте отрицательной обратной связи по току с единичным усилением, обеспечивающей заданное резистивное выходное сопротивление модулятора. Предложенный способ построения НЧ тракта УМРС обеспечивает не только стабилизацию времени задержки сигнала огибающей, но и стабилизацию выходной мощности всего передатчика в условиях рассогласования антенного тракта. При рассогласовании с КСВ=1,5 как увеличение, так и уменьшение сопротивления нагрузки в полтора раза приводят только к снижению выходной мощности, но всего на 0,2 дБ (4,7%). Без использования ООС по току при таком же рассогласовании нагрузки выходная мощность изменяется значительно больше – на 2 дБ. Показано, что для обеспечения требований ЭМС по внеполосным радиоколебаниям максимальная относительная задержка НЧ и ВЧ сигналов в УМРС не должна превышать 1 мкс при полосе сигнала 10 кГц. Рекомендуемый шаг регулировки относительной задержки НЧ и ВЧ сигналов в УМРС не должен превышать 0,2...0,25 мкс. Предложенная процедура оптимизации параметров ФНЧ ШИМ модулятора обеспечивает требования к УМРС как по уровню внеполосных, так и по уровню паразитных радиоколебаний, вызванных модуляцией сигналами тактовой частоты ШИМ и её гармоник.

## Информация об авторе:

Варламов Олег Витальевич, д.т.н., профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3996-9156>

## Для цитирования:

Варламов О.В. Способы построения функциональных узлов ШИМ модулятора для усилителя с раздельным усилением составляющих // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 12-22.

## For citation:

O. V. Varlamov, "Amplifier with separate components amplification envelope path PWM modulator functional units constructing methods," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no.2, pp. 12-22. (in Russian)

## Введение

Приведенные в ряде публикаций авторов результаты теоретических и экспериментальных исследований ключевых высокочастотных (ВЧ) генераторов [1-6], синтетических методов усиления [7-10], а также качественных и энергетических характеристик усилителей мощности с раздельным усилением составляющих (УМРС) [11-14], широко применяющихся в том числе в системах цифрового радиовещания [15-18], позволяют сформулировать практические рекомендации по схемотехнике и конструктивному выполнению основных узлов УМРС [19]. В частности, основные схемотехнические решения каскадов ВЧ тракта УМРС подробно рассмотрены в [20], особенности проектирования блока фильтров гармоник передатчика, работающего в ключевом режиме – в [21, 22]. В настоящей статье приводятся результаты дополнительных исследований, не нашедших отражения ранее в [23-27], но имеющих существенное значение для реализации усилителя мощности с раздельным усилением с высокими качественными и энергетическими характеристиками, относящиеся к особенностям построения низкочастотного (НЧ) тракта (или тракта огибающей) УМРС.

### 1 Исследование способов построения ШИМ модулятора с резистивным выходным сопротивлением

Для обеспечения высокого КПД низкочастотный тракт УМРС традиционно строится на основе ключевого (класс D) усилителя с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Напряжение на выходе НЧ тракта УМРС представляет собой усиленную огибающую входного сигнала. Этим напряжением осуществляется амплитудная (стоковая) модуляция оконечного каскада ВЧ тракта. При этом мгновенная амплитуда выходного напряжения оконечного каскада определяется выходным напряжением НЧ тракта, а выходной ток определяется импедансом нагрузки (антенной цепи). Очевидно, что при рассогласовании антенной цепи передатчика изменяется и сопротивление нагрузки НЧ тракта УМРС. При этом, например, даже незначительному рассогласованию антенного тракта с КСВн = 1,5 [28] соответствует изменение резистивной нагрузки НЧ тракта в диапазоне от  $R_n/1,5$  до  $R_n \cdot 1,5$ . Отметим, что рассогласование с КСВн = 1,5 может создаваться одним лишь фильтром гармоник УМРС при хорошо согласованной антенне. Поскольку последним элементом НЧ тракта, построенного с использованием ШИМ, является ФНЧ, то изменение нагрузки приводит к изменению его характеристик, в частности, к изменению времени задержки сигнала огибающей и, соответственно, изменению уровня внеполосных радиоколечаний на выходе УМРС [13, 25]. Очевидно, что для успешной практической реализации УМРС необходимо разработать такие схемотехнические решения, которые позволят обеспечить стабилизацию задержки сигнала в НЧ тракте с требуемой точностью при рассогласовании антенной цепи, которое на практике всегда имеет место в той или иной степени.

В настоящем разделе приводятся результаты исследования характеристик НЧ тракта УМРС и разрабатываются предложения по их стабилизации в условиях рассогласования нагрузки.

Необходимо отметить, что выходной ключевой каскад ШИМ модулятора имеет весьма низкое выходное сопротивление, т.е. является генератором напряжения по отношению к нагрузке. В этом случае выходной фильтр НЧ тракта должен проектироваться для работы от источника напряжения, т.е. как односторонне нагруженный. На рисунке 1 приводится схема такого ФНЧ, реализованного на основе прототипа фильтра Кауэра (C0420c [29] с частотой среза 35 кГц (по уровню -3 дБ). Номинальное сопротивление нагрузки фильтра равно 7 Ом. Ориентировочно такое сопротивление нагрузки может представлять собой цепь питания оконечного каскада ВЧ тракта УМРС при заданной выходной мощности 300 Вт, величине его КПД  $\approx 80\%$  и напряжении питания  $\approx 48\text{В}$ .

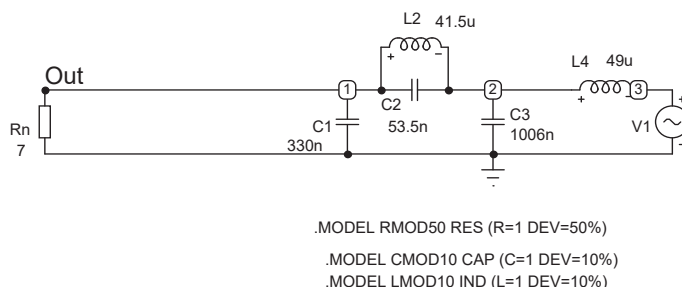


Рис. 1. Односторонне нагруженный выходной фильтр НЧ тракта

На рисунке 2 приведены результаты анализа характеристик этого ФНЧ при 3-х значениях его нагрузки: номинальном  $R_n=7$  Ом, минимальном  $R_n=4,6$  Ом и максимальном  $R_n=10,5$  Ом, соответствующих КСВн=1,5 антенного тракта УМРС. Расчеты проведены в программной среде «Micro Cap-12». На графиках (сверху вниз) приведены: АЧХ фильтра в логарифмическом масштабе, групповое время запаздывания выходного сигнала (в мкс) и выходная мощность, нормированная относительно номинального значения при  $R_n=7$  Ом (в дБ). Из результатов расчета видно, что рассогласование антенной цепи передатчика (и, соответственно, нагрузки НЧ тракта УМРС) приводит к незначительному искажению АЧХ (2...3 дБ) в области частот выше 10 кГц, и значительному изменению задержки сигнала огибающей. Так, если при номинальной нагрузке задержка составляет  $\approx 13$  мкс, то при минимальной нагрузке  $R_n=4,6$  Ом задержка увеличивается до 20 мкс, а при максимальной  $R_n=10,5$  Ом задержка снижается до 9 мкс. Такое значительное изменение задержки сигнала огибающей (+7; -4 мкс) существенно превосходит допустимые требования ( $\pm 1$  мкс для полосы сигнала 10 кГц), определенные в [19] и делает практически невозможным обеспечение заданного уровня внеполосных радиоколечаний УМРС, поскольку даже полная компенсация задержки в согласованном режиме будет существенно нарушена при рассогласовании антенного тракта.

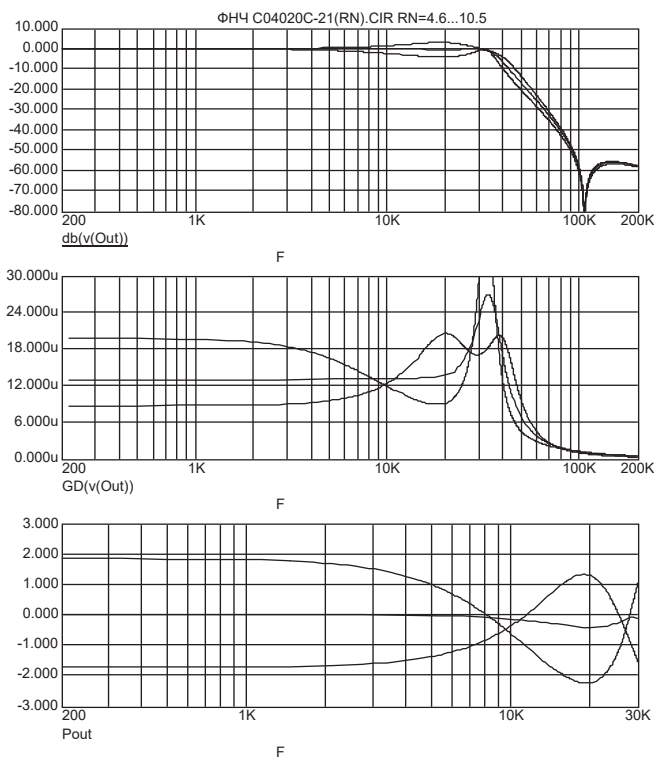


Рис. 2. Результаты анализа односторонне нагруженного фильтра НЧ тракта УМРС

В связи с вышесказанным, был проведен поиск новых схемотехнических решений, направленных на стабилизацию задержки в НЧ тракте УМРС. Проведенные исследования [13, 25] показали, что двусторонне нагруженные фильтры, спроектированные и работающие от источника сигнала с согласованным выходным резистивным сопротивлением, равным сопротивлению нагрузки фильтра, обеспечивают требуемую стабильность задержки сигнала при рассогласовании. Для реализации такого режима в НЧ тракте УМРС необходимо обеспечить резистивное выходное сопротивление оконечного каскада класса D. Обеспечить требуемое выходное сопротивление можно двумя способами:

- включить между оконечным каскадом и фильтром НЧ тракта согласованный резистор, равный сопротивлению нагрузки;
- охватить оконечный каскад отрицательной обратной связью по току, повышающей его выходное сопротивление до требуемой величины.

Естественно, что первый способ не приемлем для реализации высокоэффективного УМРС, поскольку резко снижает КПД НЧ тракта и всего передатчика в целом. Поэтому дальнейшие исследования проводятся в направлении использования ООС по току в НЧ тракте. Исследуемая модель НЧ тракта приведена на рисунке 3.

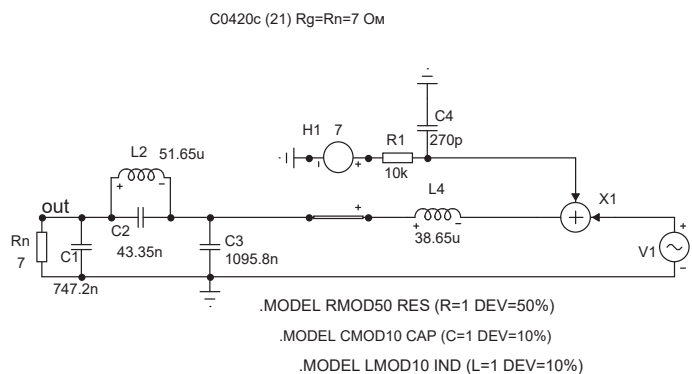


Рис. 3. Модель НЧ тракта УМРС с отрицательной ОС по току

Здесь используется аналогичный ФНЧ, реализованный на основе прототипа фильтра Кауэра C0420 с частотой среза 35 кГц и номинальной нагрузкой 7 Ом, но спроектированный как двусторонне нагруженный фильтр [29], работающий от согласованного источника сигнала с выходным сопротивлением 7 Ом. В схеме присутствует преобразователь тока в напряжение – элемент H1, имеющий коэффициент преобразования 7. Это означает, что при протекании тока 1А по измерительному проводу, включенному последовательно с источником сигнала V1 и индуктивностью фильтра L4, на его выходных зажимах развивается напряжение 7В. Это напряжение используется в качестве сигнала отрицательной обратной связи, для чего суммируется с обратным знаком в сумматоре X1 с напряжением входного источника V1. При этом петлевое усиление разомкнутой петли отрицательной обратной связи равно 1, что обеспечивает её потенциальную устойчивость.

Модель сумматора X1, примененная в анализе, имеет бесконечно большое сопротивление по входам и нулевое сопротивление по выходу. Сигнал ООС поступает на сумматор через низкочастотный RC фильтр (элементы R1, C4) с частотой среза 60 кГц. Этот фильтр ограничивает полосу пропускания ООС и обеспечивает устойчивость в реальном устройстве, где возможный набег фазы в усилительных элементах на высоких частотах может вызвать самовозбуждение.

На рисунке 4 приведены результаты анализа представленной модели НЧ тракта УМРС. Расчеты проводились для тех же условий, что и в случае односторонне нагруженного фильтра (рис. 2).

Из графиков рисунке 4 видно, что рассогласование нагрузки НЧ тракта УМРС не приводит к искажению формы АЧХ, а лишь изменяется усиление сигнала огибающей на 2...3 дБ. Однако выходная мощность изменяется всего на 0,2 дБ, и, что особенно важно, задержка сигнала огибающей при рассогласовании нагрузки практически не изменяется (средний график на рис. 4).

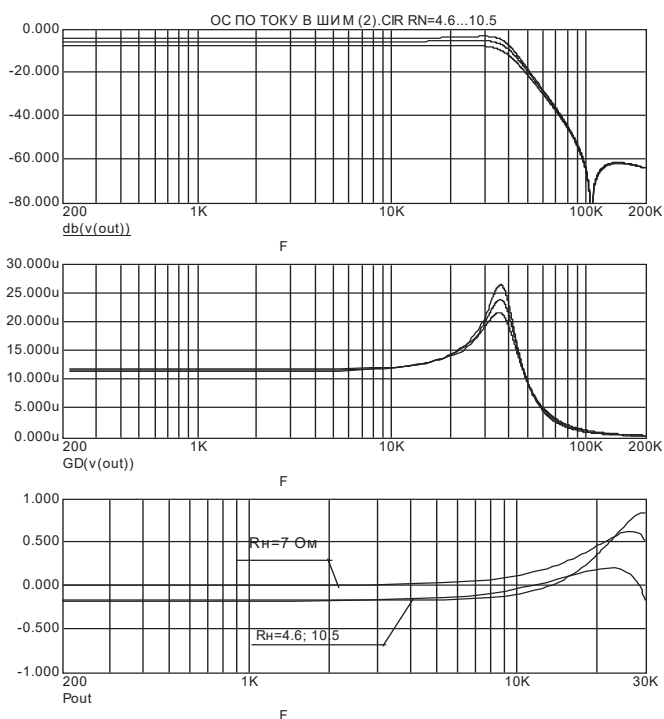


Рис. 4. Результаты анализа модели НЧ тракта УМРС с ООС по току

Рассмотрим теперь подробнее нижний график на Рис. 4, из которого видно, что максимальная выходная мощность НЧ тракта соответствует его номинальной нагрузке  $R_n=7 \text{ Ом}$ . При рассогласовании с КСВ=1,5 как увеличение, так и уменьшение сопротивления нагрузки ( $R_n=4,6; 10,5 \text{ Ом}$ ) приводят только к снижению выходной мощности, но всего на 0,2 дБ ( $\approx 4,7\%$ ). Такое поведение источника сигнала характерно для согласованных источников, имеющих выходное сопротивление, равное сопротивлению нагрузки. Без использования ООС по току при таком же рассогласовании нагрузки выходная мощность изменяется значительно больше (на  $\pm 2 \text{ дБ}$ , рис. 2).

Отметим, что мощность в нагрузке НЧ тракта – это мощность, подводимая к оконечному каскаду ВЧ тракта. При высоком КПД оконечного ВЧ каскада стабилизация подводимой мощности практически эквивалентна стабилизации выходной мощности передатчика [30].

Таким образом, предложенный способ построения НЧ тракта УМРС обеспечивает не только стабилизацию времени задержки сигнала огибающей, но и стабилизацию выходной мощности передатчика в условиях рассогласования антенного тракта.

Весьма важным вопросом при практической реализации любого радиотехнического устройства является стабильность его характеристик при разбросе параметров входящих в него элементов. Для предложенной структуры НЧ тракта УМРС с ООС по току были проведены статистические исследования изменения времени задержки сигнала огибающей при 10% разбросе элементов ФНЧ. Исследования проводились при равномерной вероятности отклонения номиналов применяемых элементов фильтра методом Монте-Карло для 50 реализаций.

Результаты анализа, приведенные на рисунке 5, показывают, что задержка изменяется незначительно (отклонение времени задержки не превышает  $\pm 0,8 \text{ мкс}$ ).

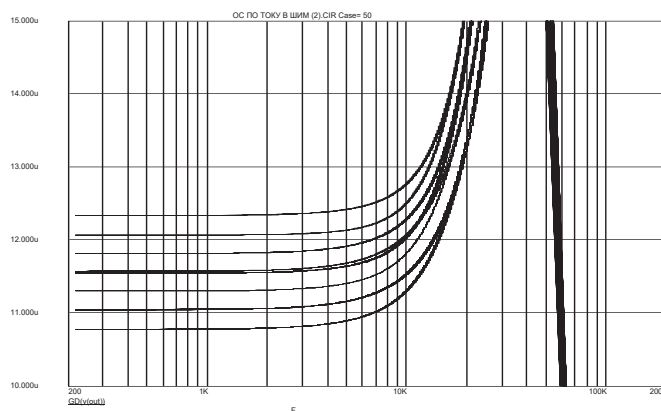


Рис. 5. Изменение задержки в НЧ тракте УМРС с отрицательной ОС по току при 10% разбросе элементов ФНЧ

Таким образом, предложенная в настоящем разделе отрицательная обратная связь по току с единичным петлевым усилением совместно с двусторонне нагруженным ФНЧ в НЧ тракте УМРС позволят обеспечить практически стабильную задержку сигнала огибающей в НЧ тракте и, соответственно, обеспечить требуемый уровень внеполосных радиокосильных при её компенсации. Кроме того, в качестве дополнительных преимуществ предложенная ООС обеспечивает некоторую стабилизацию выходной мощности УМРС при рассогласовании и, как всякая обратная связь, снижение искажений сигнала огибающей в НЧ тракте - в данном случае на 6 дБ.

Предложенный способ построения ШИМ модулятора накладывает свои требования на структурную схему мощного УМРС, содержащего несколько суммируемых усилительных модулей, в каждом из которых должно быть реализовано своё кольцо ООС по току. Кольцо ООС должно охватывать НЧ тракт от входа НЧ огибающей до входа ФНЧ, где устанавливается резистивный токовый шунт (наилучшее место – после первой продольной индуктивности ФНЧ). При этом цепи формирования ШИМ последовательности находятся внутри кольца ООС. Таким образом, каждая унифицированная усилительная ячейка мощного УМРС должна содержать в НЧ тракте свой (отдельный) формирователь ШИМ последовательности, что несколько усложняет её схемотехнику, но позволяет обеспечить требования по линейности УМРС в целом.

Для выяснения причин отличия влияния фильтров со стандартной АЧХ Кауэра и фильтров с плавным переходом на спектральные характеристики выходного сигнала УМРС был проведен анализ их импульсных характеристик. На Рис. 6 приведены результаты расчета импульсных характеристик двусторонне нагруженных ФНЧ передатчика серии DAX фирмы Narris и стандартного ФНЧ С0610, которые представляют собой отклик на выходе ФНЧ на скачок входного напряжения с единичной ЭДС. Результаты получены моделированием в программе «Micro Cap-12».

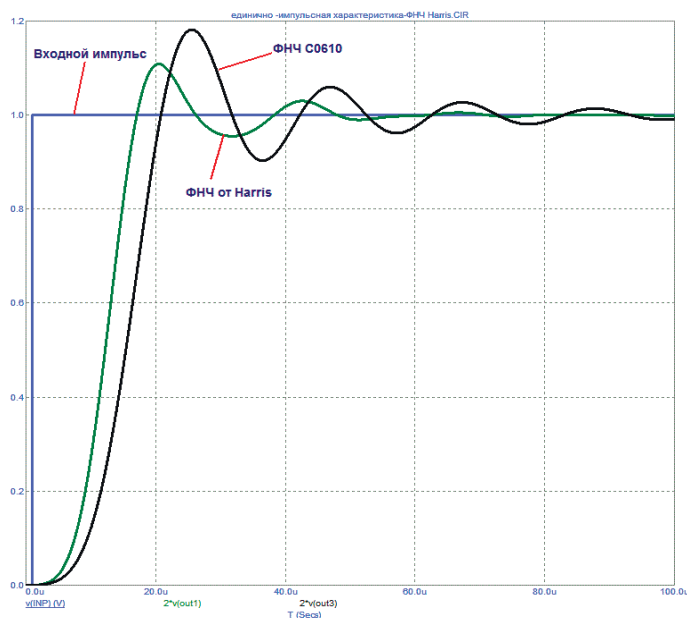


Рис. 6. Переходные характеристики двусторонне нагруженных ФНЧ от Harris и стандартного ФНЧ С0610

Как видно из рисунка 6, импульсные характеристики фильтров значительно отличаются. Импульсная характеристика ФНЧ от Harris имеет быстро затухающие свободные колебания, в отличие от переходной характеристики стандартного ФНЧ С0610, имеющей свободные колебания большей амплитуды и длительности. Отметим, что частота свободных колебаний соответствует частоте среза ФНЧ. Подобные свободные колебания, возникающие при усилении огибающей в УМРС, обуславливают всплески внеполосных радиоколечаний, отмеченные кружками на рисунках [25, рис. 13, 14]. Таким образом, можно утверждать, что искажения, связанные с использованием ФНЧ в НЧ тракте УМРС, определяются двумя причинами – ограничением спектра огибающей и свободными колебаниями, вызванными воздействием импульсного сигнала огибающей. При использовании ФНЧ с плавным переходом внеполосные излучения, вызванные второй причиной, значительно меньше внеполосных излучений, вызванных ограничением спектра огибающей и маскируются под ними. Поэтому использование таких ФНЧ с плавным переходом допускает минимальную полосу пропускания НЧ тракта УМРС – 3,5 полос усиляемого сигнала [19, 25]. При использовании стандартного ФНЧ Кауэра, наоборот, доминирующей причиной внеполосных радиоколечаний являются свободные колебания в фильтре. В этом случае для обеспечения требований ЭМС приходится увеличивать полосу пропускания ФНЧ [25], что уменьшает амплитуду этих колебаний.

Теперь рассмотрим, как влияет относительная задержка сигналов НЧ огибающей и ВЧ ФМ составляющей усиливаемого сигнала на искажения выходного сигнала УМРС.

## 2 Исследования влияния относительной задержки НЧ и ВЧ составляющих на внеполосные радиоколечания

Для проведения этих исследований использовался DRM сигнал с полосой 10 кГц и та же модель УМРС, что и в [14]. В качестве ФНЧ в тракте огибающей использовался двусторонне нагруженный фильтр с плавным переходом от Harris с

частотой среза 60 кГц. На Рисунке 7 приведен полученный в результате компьютерного моделирования спектр выходного сигнала УМРС при отсутствии относительной задержки (полной её компенсации).

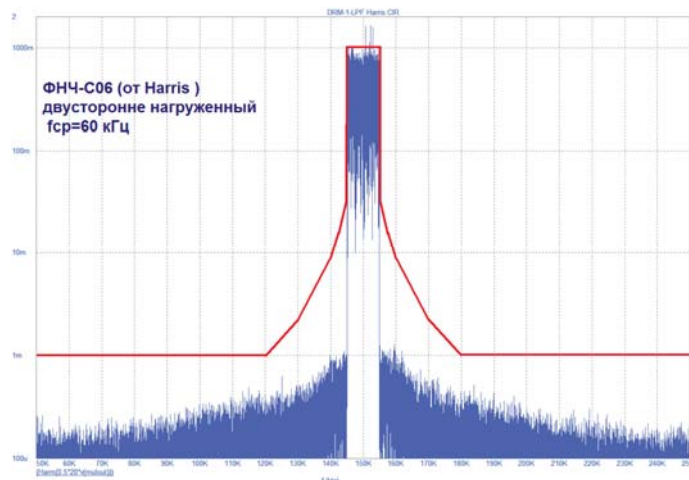


Рис. 7. Спектр выходного сигнала УМРС при отсутствии относительной задержки НЧ и ВЧ сигналов

Как видно из рисунка 7, при полной компенсации задержки спектр удовлетворяет требованиям нормативной документации по уровню внеполосных радиоколечаний с запасом 8...10 дБ, что позволяет корректно проводить исследования влияния задержки, поскольку остальные причины искажений пренебрежимо малы.

Далее были проведены исследования спектра выходного сигнала УМРС при различных значениях относительной задержки НЧ и ВЧ сигналов, что позволило определить предельное её значение, при котором обеспечивается предельно допустимый уровень внеполосных радиоколечаний. Спектр выходного сигнала УМРС при предельном значении относительной задержки 1 мкс приведен на рисунке 8.

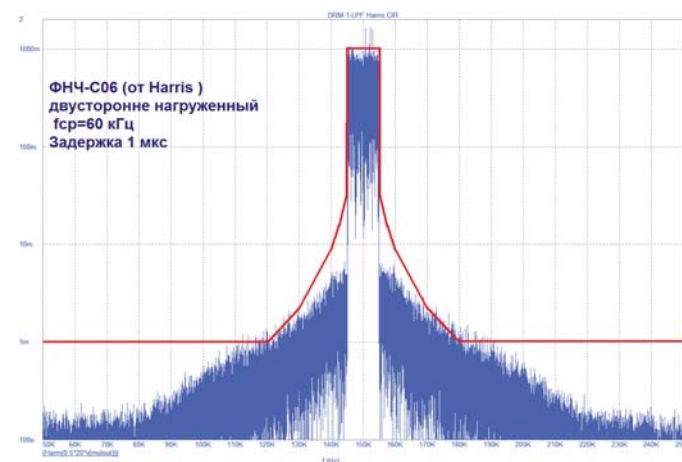


Рис. 8. Спектр выходного сигнала УМРС при относительной задержке НЧ и ВЧ сигналов 1 мкс

Как следует из спектра, приведенного на рисунке 8, относительная задержка, равная 1 мкс, вызывает внеполосные радиоколечания с максимально допустимым уровнем внеполосных радиоколечаний и является предельной. Увеличение задержки приводит к возрастанию внеполосных радиоколечаний выше допустимых значений.

Для оценки допустимого шага регулировки компенсирующей задержки ВЧ сигнала в реальных усилителях мощности на рисунке 9 приведен спектр выходного сигнала с относительной задержкой 0,2 мкс. Как видно из этого рисунка, относительная задержка НЧ и ВЧ сигналов в УМРС порядка 0,2 мкс обеспечивает уровень внеполосных радиоклебаний на  $\approx 6$  дБ ниже ограничительной линии. Такой запас позволяет обеспечить требования нормативной документации по внеполосным радиоклебаниям выходного сигнала УМРС при одновременном воздействии других причин искажений, рассмотренных ранее.

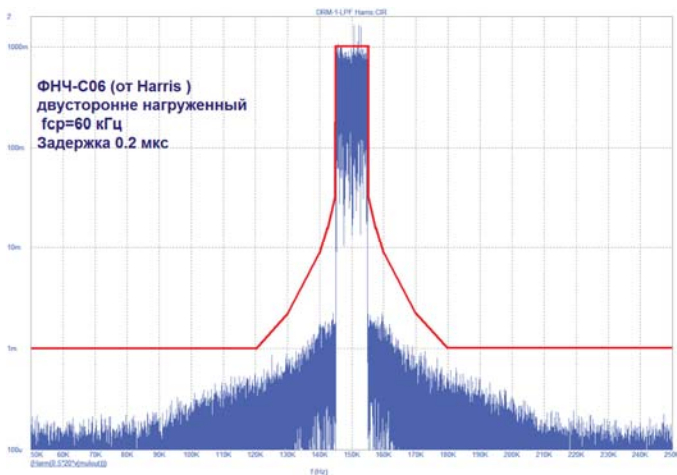


Рис. 9. Спектр выходного сигнала УМРС при относительной задержке НЧ и ВЧ сигналов 0,2 мкс

В заключение отметим, что разработанные в настоящем разделе требования, касающиеся минимальной полосы пропускания НЧ тракта УМРС (не менее 3,5 полос усиливаемого сигнала) и максимальной относительной задержки НЧ и ВЧ сигналов не более 1 мкс, соответствуют аналогичным требованиям, разработанным специалистами DRM консорциума [31].

В следующем разделе будет рассмотрен способ проектирования ФНЧ модулятора, обеспечивающего требуемый уровень искажений выходного сигнала при сохранении высокого КПД усилителя мощности.

### 3 Оптимизация ФНЧ модулятора, направленная на достижение требуемого уровня искажений выходного сигнала при сохранении высокого КПД усилителя мощности

Как было показано в предыдущем разделе, искажения связанные с использованием ФНЧ в НЧ тракте УМРС определяются двумя причинами: ограничением спектра огибающей и свободными колебаниями, вызванными воздействием импульсного сигнала огибающей на ФНЧ. Рассмотренный в предыдущем разделе вариант ФНЧ, использованный в передатчиках серии DAX фирмы Harris, является наиболее подходящим для применения в разрабатываемом УМРС. Однако, он имеет недостаточное подавление напряжения тактовой частоты ШИМ и поэтому не удовлетворяет требованиям на побочные излучения. Отметим, что изменение некоторых параметров ФНЧ, таких, как частота среза или номинальное сопротивление нагрузки, производится достаточно просто –

масштабированием LC элементов фильтра [29]. Однако изменение подавления ФНЧ в полосе задерживания требует его полного перепроектирования. Рассмотрим, как был спроектирован ФНЧ передатчика Harris. Поскольку этот ФНЧ не относится к стандартным и обеспечивает специфические требования, предъявляемые УМРС при усилении OFDM сигналов, то наиболее вероятным способом его проектирования могла бы являться параметрическая оптимизация в составе передатчика, направленная на достижение необходимого уровня внеполосных радиоклебаний.

К сожалению, в настоящее время программные продукты, оперирующие одновременно с частотами огибающей (от постоянного тока) до высокочастотного заполнения ФМ составляющей, пока еще недоступны. В связи с этим был разработан другой метод проектирования, также основанный на параметрической оптимизации в доступных симуляторах. Суть этого метода заключается в том, что проектируемый ФНЧ должен иметь АЧХ в полосе пропускания и на начальном (плавном) участке полосы задерживания не отличающуюся от характеристики образцового фильтра используемого в передатчиках серии DAX фирмы Harris. Дополнительно накладывается требование на обеспечение требуемого подавления в полосе задерживания не менее 87 дБ, которое было обосновано в [19].

Оба эти требования закладываются в виде целевой функции при параметрической оптимизации двусторонне нагруженного ФНЧ 6-го порядка со структурой Кауэра. На рисунке 10 приведены АЧХ двух ФНЧ: образцового фильтра передатчика Harris (график красного цвета, помеченный квадратными маркерами) и оптимизированного фильтра для разрабатываемого УМРС (график синего цвета без маркеров). Как видно из приведенных графиков, АЧХ оптимизированного ФНЧ в полосе пропускания и на начальном участке переходной области практически совпадают, а в полосе задерживания оптимизированный ФНЧ обеспечивает требуемое затухание 87 дБ, что на  $\approx 13$  дБ больше, чем ФНЧ от Harris.

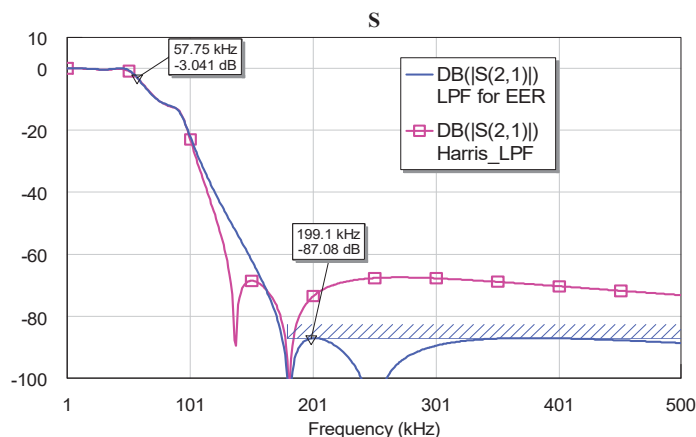


Рис. 10. АЧХ двусторонне нагруженных ФНЧ от Harris (график красного цвета) и оптимизированного ФНЧ С06 с плавным переходом (график синего цвета). Полоса пропускания обоих ФНЧ по уровню -3дБ составляет  $\approx 58$  кГц

На рисунке 11 приведен модуль разности АЧХ двух фильтров, минимизация которого, как отмечалось ранее, является также целевой функцией при параметрической оптимизации. Как видно из приведенного рисунка, отклонение

АЧХ оптимизированного ФНЧ от образцового в полосе пропускания и на начальном участке переходной области не превышает 0,3 дБ, что говорит о практической их идентичности.

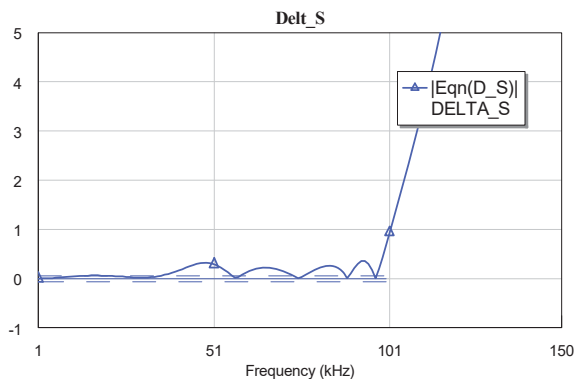


Рис. 11. Разность АЧХ двусторонне нагруженных ФНЧ от Harris и оптимизированного ФНЧ С06 с плавным переходом

После проведенной оптимизации, в результате которой определены все LC элементы ФНЧ с требуемыми характеристиками, было проведено его масштабирование по частоте. Целью масштабирования является перемещение по частоте первого полюса затухания, расположенного на частоте 181 кГц (рис. 10), на выбранную для ШИМ модулятора тактовую частоту 150 кГц, что обеспечит максимальное подавление напряжения тактовой частоты. Для масштабирования все номиналы элементов ФНЧ умножены на величину  $(150/181) = 0,83$ . При этом частота среза ФНЧ теперь составляет 48 кГц, что вполне достаточно для выполнения требований ЭМС к уровню внеполосных радиокосебаний. Результирующая схема оптимизированного ФНЧ с номиналами его элементов приведена на рисунке 12. АЧХ и ГВЗ этого фильтра, полученные в результате анализа в программе «Micro Cap-12», приведены на рисунке 13.

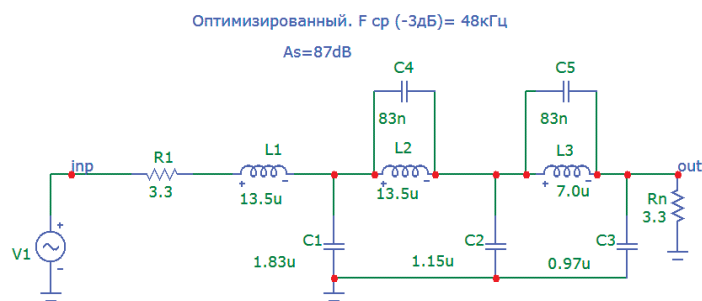


Рис. 12. Схема двусторонне нагруженного оптимизированного ФНЧ С06 с плавным переходом,  $F_{cp} = 48$  кГц

Как видно из Рис. 13, первый полюс затухания находится на заданной частоте 150 кГц, частота среза составляет 48 кГц, что полностью отвечает желаемым значениям. Групповое время запаздывания в полосе сигнала составляет 11,7 мкс, что необходимо учитывать во время настройки УМРС для его компенсации, т.е. обеспечения равной задержки ВЧ ФМ составляющей в возбудителе.

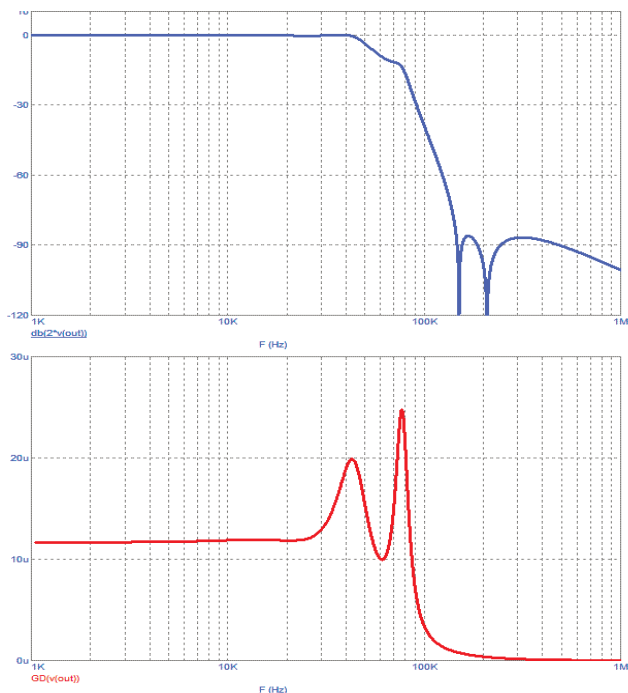


Рис. 13. АЧХ (вверху) и ГВЗ (внизу) двусторонне нагруженного оптимизированного ФНЧ С06 с плавным переходом

На рисунке 14 приведены результаты статистического анализа характеристик разработанного ФНЧ при 5% разбросе его элементов.

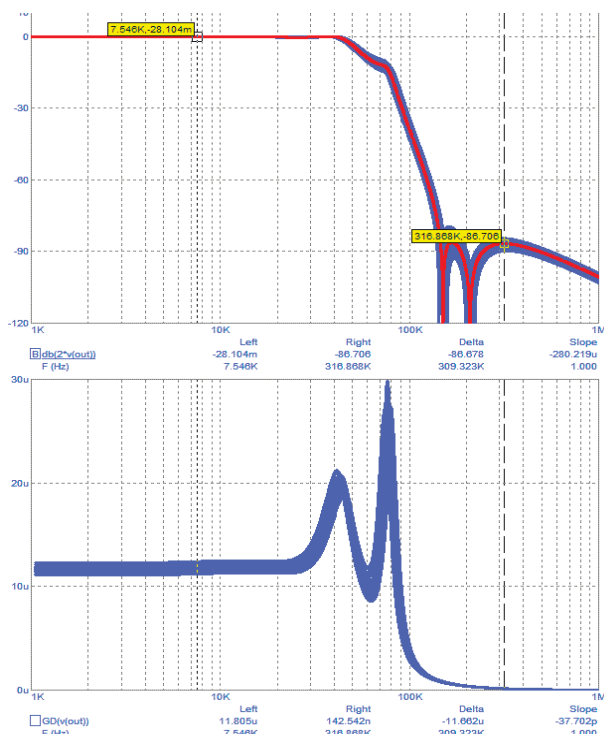


Рис. 14. Результаты статистического анализа АЧХ (вверху) и ГВЗ (внизу) двусторонне нагруженного оптимизированного ФНЧ С06 с плавным переходом при 5% разбросе LC элементов

Как следует из рисунка 14, при 5% разбросе элементов ФНЧ его АЧХ в полосе пропускания практически не изменяется, затухание в полосе задерживания может снизиться относительно расчетного значения 87дБ не более чем на 3 дБ, что покрывается выбранным ранее запасом, рассчитанным как раз на случай разброса элементов. Групповое время запаздывания изменяется не более чем на  $\pm 0,6$  мкс, что также легко компенсируется в процессе настройки реальной конструкции УМРС.

Результаты моделирования выходного спектра УМРС на DRM сигнале с разработанным ФНЧ приведены на рисунке 15.

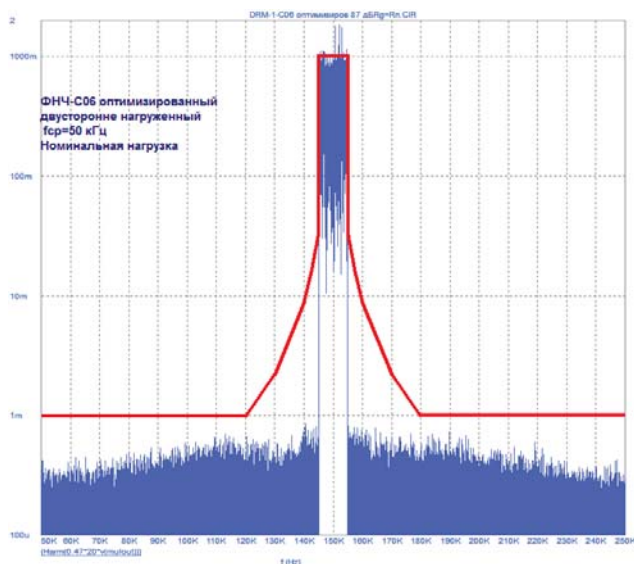


Рис. 15. Спектр выходного DRM сигнала УМРС при использовании разработанного ФНЧ

Как следует из рисунка 15, уровень внеполосных радиокосильаний удовлетворяет требованиям ЭМС с запасом 5...6 дБ, что оставляет запас для воздействия других возможных причин искажений сигнала в УМРС.

Исследования уровня напряжения тактовой частоты ШИМ и её гармоник на выходе модулятора были проведены в программе «Micro Cap-12» при воздействии прямоугольного напряжения со скважностями 50% и 90%. Полученные результаты приведены на рисунках 16 и 17, соответственно.

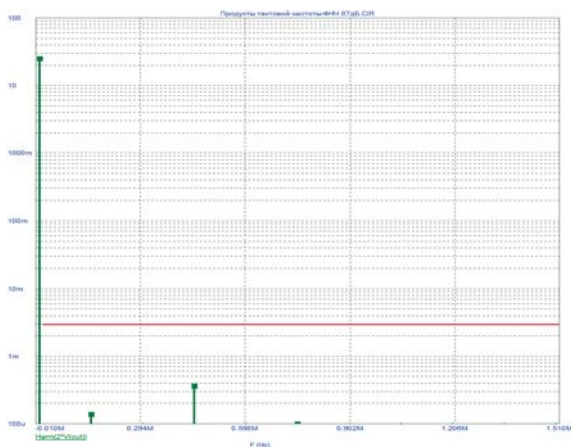


Рис. 16. Спектр выходного сигнала ШИМ модулятора с оптимизированным двусторонне нагруженным ФНЧ С06 при скважности ШИМ последовательности 50%

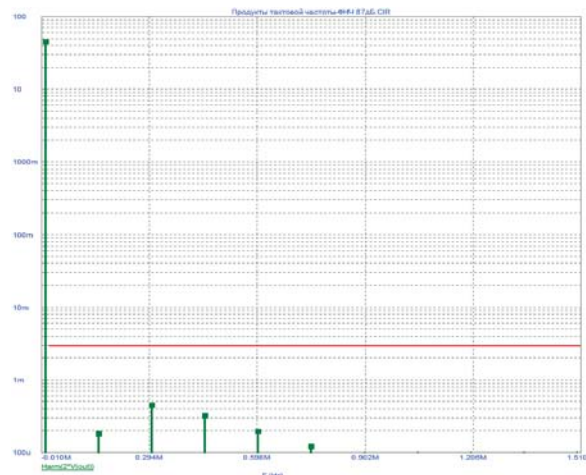


Рис. 17. Спектр выходного сигнала ШИМ модулятора с оптимизированным двусторонне нагруженным ФНЧ С06 при скважности ШИМ последовательности 90%

На этих же рисунках показаны горизонтальные ограничительные линии (красного цвета), которые соответствуют уровню тактовой частоты, обеспечивающему требования к уровню паразитных радиокосильаний на выходе УМРС не более минус 90 дБ. Как следует из приведенных рисунков, требования к паразитным радиокосильаний выполняются с запасом  $\approx 10$  дБ при скважности как 90% так и 50%, что соответствует полной номинальной мощности УМРС и 0,25 от номинальной мощности, соответственно.

Таким образом, разработанный в настоящем разделе ФНЧ ШИМ модулятора, в составе УМРС обеспечивает требования как по уровню внеполосных, так и по уровню паразитных радиокосильаний, вызванных модуляцией сигналами тактовой частоты ШИМ и её гармоник.

### Выводы

Предложенный способ построения ШИМ модулятора с ООС по току обеспечивает не только стабилизацию времени задержки сигнала огибающей, но и стабилизацию выходной мощности передатчика в условиях рассогласования антенного тракта.

Показано, что для обеспечения требований ЭМС по внеполосным радиокосильаниям максимальная относительная задержка НЧ и ВЧ сигналов в УМРС не должна превышать 1 мкс при полосе сигнала 10 кГц. Рекомендуемый шаг регулировки относительной задержки НЧ и ВЧ сигналов в УМРС не должен превышать 0,2...0,25 мкс.

Наиболее предпочтительным для использования в НЧ тракте УМРС является ФНЧ с плавным переходом.

Предложенная процедура оптимизации параметров ФНЧ ШИМ модулятора обеспечивает требования к УМРС как по уровню внеполосных, так и по уровню паразитных радиокосильаний, вызванных модуляцией сигналами тактовой частоты ШИМ и её гармоник.

### Благодарности

Автор выражает благодарность безвременно ушедшему из жизни с.н.с. МТУСИ Виктору Николаевичу Громорушкину за многолетнее совместное творчество в области разработки высокоэффективных усилителей мощности с разделным усилением составляющих.

## Литература

1. *Varlamov O.V., Gromorushkin V.N., Kozyrev V.B., Melanin A.V.* Addition of the power outputs from push-pull voltage-switching oscillators having a resistive load // *Radioelectronics and Communications Systems*. 1989. Т. 32. № 7. С. 30-35. EDN: KNLL0C
2. *Varlamov O.V., Gromorushkin V.N.* High efficiency power amplifier for IoT applications: RF path // В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2020. С. 9078651. DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651. EDN: GLDQSN
3. *Долгопятова А.В., Варламов О.В.* Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режимах с переключением тока и мостовом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 3. С. 4-13. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-4-13. EDN: WPRCAP
4. *Варламов О.В.* Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 10. С. 4-11. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-10-4-11. EDN: GANBPS
5. *Varlamov O.V.* Theoretical approach to calculating reverse intermodulation distortion in voltage mode class D RF power amplifiers // В сборнике: 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings. 2022. DOI: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744320. EDN: AGVQSZ
6. *Варламов О.В.* Имитационная модель для анализа интермодуляционных искажений в ключевых ВЧ усилителях мощности с отдельным усилением составляющих // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №10. С. 4-11. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-4-11. EDN: FPMAWU
7. *Нго Куок Фунг, Варламов О.В.* Инженерно-технические принципы построения высокоэффективных линейных радиопередатчиков носимых радиосредств // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №4. С. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-4-4-14. EDN: KNMAUR
8. *Варламов О.В., Нгуен Д.К., Грычкин С.Е.* Комбинирование синтетических методов высокоэффективного высокочастотного усиления // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 9. С. 11-16. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16. EDN: MJNCUK
9. *Нго К.Ф., Громорушкин В.Н., Варламов О.В.* Динамические режимы и работа на рассогласованную нагрузку при непосредственном суммировании ключевых генераторов в передатчиках с дефазированием // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №3. С. 13-23. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-13-23. EDN: GRAXPV
10. *Нго К.Ф., Бекушев Н.С., Громорушкин В.Н., Варламов О.В.* Особенности схемотехники непосредственного суммирования ключевых генераторов в передатчиках с дефазированием // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №2. С. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-4-14. EDN: GZDBMJ
11. *Варламов О.В.* Теоретические основы изучения причин возникновения нелинейных искажений в современных высокоэффективных передатчиках // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2022. Т. 11. № 4. С. 15-22. EDN: TBBETD
12. *Варламов О.В.* Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. -2014. -№ 2. С. 59-60. EDN: SARICJ
13. *Нгуен Д.К., Варламов О.В.* Зависимость уровня искажений выходного сигнала передатчика современных телекоммуникационных сигналов с разделением составляющих от параметров фильтра тракта огибающей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 2. С. 12-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-12-26. EDN: STHETO
14. *Нгуен Д.К., Варламов О.В.* Имитационная модель для исследования работы ключевых ВЧ-усилителей мощности с отдельным усилением составляющих на узкополосную нагрузку // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 10-18. DOI: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18. EDN: CAFGOC
15. *Варламов О.В.* Организация одночастотных сетей цифрового радиовещания стандарта DRM. Особенности и результаты практических испытаний // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 11. С. 4-20. EDN: YQNCWT
16. *Варламов О.В., Варламов В.О., Долгопятова А.В.* Международная сеть DRM вещания для создания информационного поля в Арктике // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 9. С. 9-16. EDN: CHEXOK
17. *Varlamov O.V., Bychkova A.A.* Basis of Technical Design and Development a Single-Frequency DRM Digital Broadcasting Network for Venezuela // В сборнике: 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, 2021), pp. 1-7. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488396. EDN: SYEEIO
18. *Varlamov O., Varlamov V., Dolgopyatova A.* Digital Radio Broadcasting Network in the Arctic Region // В сборнике: 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 2019, pp. 457-462. DOI: 10.23919/FRUCT.2019.8711933. EDN: BVWFYC
19. *Громорушкин В.Н., Варламов О.В.* Разработка требований к характеристикам отдельных узлов высокоэффективного передатчика, построенного по методу отдельного усиления составляющих однополосных колебаний // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17. № 4. С. 28-34. DOI: 10.36724/2409-5419-2025-17-4-28-34. EDN: WFABSZ
20. *Громорушкин В.Н., Варламов О.В.* Разработка компьютерной модели высокочастотного тракта усилителя с отдельным усилением составляющих и исследование причин его специфических искажений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. № 19. С. 23-34. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-9-23-34. EDN: CKKLOE
21. *Gromorushkin V. N., Varlamov O. V.* Harmonic Filter for Envelope Elimination and Restoration Switching Mode Class D Transmitter // В сборнике: 2025 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH65814.2025.11220583.
22. *Громорушкин В.Н.* Разработка фильтра гармоник для коротковолнового ключевого передатчика // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 10. С. 20-23. EDN: SZOQV
23. *Варламов О.В.* Построение мощных широкополосных усилителей постоянного тока модуляционного тракта передатчиков с отдельным усилением составляющих // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-4-14. EDN: MWFYUG
24. *Varlamov O., Nguyen D.C., Grebennikov A.* Broadband and efficient envelope amplifier for envelope elimination and restoration/envelope tracking higher-efficiency power amplifiers // *Sensors*. 2022. Т. 22. № 23. С. 9173. DOI: 10.3390/s22239173. EDN: BRCSHZ
25. *Nguyen D.C., Gromorushkin V.N., Varlamov O.V.* Theoretical comparison of different envelope elimination and restoration transmitter PWM modulator configurations to expand the possible antenna mismatch // *Sensors*. 2023. Т. 23. № 23. С. 9466. DOI: 10.3390/s23239466. EDN: SFWAMZ
26. *Грычкин С.Е., Захаров А.М., Варламов О.В.* Методика расчета КПД ШИМ модулятора на GAN FET транзисторах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 9. С. 19-27. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-9-19-27. EDN: ZSQCRM
27. *Грычкин С.Е., Варламов О.В.* Высокоэффективный многоуровневый GaN FET ШИМ модулятор для передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОВЧ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №9. С. 4-12. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-4-12. EDN: KPARZM
28. *Варламов О.В.* Максимальная мощность коммутируемого р-и-п диодами антенно-согласующего устройства диапазона ВЧ при рассогласовании нагрузки // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 10. С. 26-32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-10-26-32. EDN: UHVNT
29. *Зааль Р.* Справочник по расчету фильтров: Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1983. 752 с.
30. *Викторов К.А., Варламов О.В., Громорушкин В.Н.* Устройство для УВЧ-терапии // Патент на изобретение RU 2019206 С1, 15.09.1994. Заявка № 5044785/14 от 01.06.1992.
31. *DRM Introduction and Implementation Guide. Revision 2, September 2013.* // Интернет ресурс: <http://www.drm.org/wp-content/uploads/2013/09/DRM-guide-artwork-9-2013-1.pdf>, Дата обращения 11.11.2025 г.

## AMPLIFIER WITH SEPARATE COMPONENTS AMPLIFICATION ENVELOPE PATH PWM MODULATOR FUNCTIONAL UNITS CONSTRUCTING METHODS

Oleg V. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [vov@mtuci.ru](mailto:vov@mtuci.ru)

### Abstract

This article presents the results of additional research that was not reflected earlier, but is of significant importance for the implementation of a power amplifier (PA) with Envelope Elimination and Restoration (EER) with high quality and energy characteristics, related to the EER PA low-frequency (LF, or envelope) path design features. In particular, to stabilize the amplifier parameters under conditions of antenna mismatch that is always present in practice, the use of a double-sided low-pass filter with a smooth transition in the modulation path is justified. For the practical implementation of this solution, it is proposed to use negative current feedback with unity gain in the modulation path, providing a given resistive output impedance of the modulator. The proposed method for constructing the EER PA LF path ensures not only stabilization of the envelope signal delay time, but also entire transmitter output power stabilization under conditions of antenna mismatch. When mismatched with  $SWR = 1.5$ , both an increase and a decrease in load resistance by one and a half times only lead to a decrease in output power, but only by 0.2 dB (4.7%). Without using current feedback, with the same load mismatch, the output power changes significantly more - by 2 dB. It is shown that in order to meet the EMC requirements for out-of-band radio oscillations, the maximum relative delay of LF and HF signals in the EER PA should not exceed 1 ns with a 10 kHz signal bandwidth. The recommended step for adjusting the relative delay of LF and HF signals in the EER PA should not exceed 0.2...0.25 ns. The proposed procedure for optimizing the PWM modulator low-pass filter parameters provides requirements for the EER PA both in terms of the level of out-of-band and the level of spurious radio oscillations caused by modulation of the PWM clock frequency signals and its harmonics.

**Keywords:** Envelope Elimination and Restoration (EER), negative current feedback, nonlinear distortion, relative delay of components, power amplifier, PWM modulator

### References

- [1] O.V. Varlamov, V.N. Gromorushkin, V.B. Kozyrev, A.V. Melanin, "Addition of the power outputs from push-pull voltage-switching oscillators having a resistive load," *Radioelectronics and Communications Systems*. 1989. vol. 32. no 7, pp. 30-35.
- [2] O.V. Varlamov, V.N. Gromorushkin, "High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651.
- [3] A.V. Dolgopyatova, O.V. Varlamov, "Intermodulation distortion in current mode and bridge class D switching amplifiers with resistive load," *T-Comm*, 2023. vol. 17, no.3, pp. 4-13. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-4-13
- [4] O.V. Varlamov, "Intermodulation distortion in voltage mode class D switching amplifiers with resistive load," *T-Comm*, 2022. vol. 16, no.10, pp. 4-11. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-10-4-11.
- [5] O.V. Varlamov, "Theoretical Approach to Calculating Reverse Intermodulation Distortion in Voltage Mode Class D RF Power Amplifiers," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744320.
- [6] O.V. Varlamov, "Simulation model for the analysis of intermodulation distortion in class D switching RF power amplifiers with separate amplification," *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.10, pp. 4-11. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-4-11.
- [7] Ngo Quoc Fung, O.V. Varlamov, "Engineering and technical principles of highly effective linear radio transmitters construction for HF man-pack radios," *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.4, pp. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-4-4-14.
- [8] O.V. Varlamov, D.C. Nguyen, S.E. Grychkin, "Combination of synthetic high-performance RF amplification techniques," *T-Comm*. 2021. vol. 15, no.9, pp. 11-16. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16.
- [9] Q.F. Ngo, V.N. Gromorushkin, O.V. Varlamov, "Outphasing transmitters with switching generators direct summation: dynamic modes and mismatched load operation," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.3, pp. 13-23. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-13-23.
- [10] Q. F. Ngo, N. S. Bekushev, V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, "Outphasing transmitter circuit with switching generators direct summation design features," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.2, pp. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-4-14.
- [11] O.V. Varlamov, "Theoretical foundations for studying the causes of non-linear distortions in modern high-performance transmitters," *Methodological issues of teaching infocommunications in higher education*. 2022. Vol. 11. No. 4, pp. 15-22.
- [12] O. Varlamov, "Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters," *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No. 2, pp. 59-60.

- [13] D.C. Nguyen, O.V. Varlamov, "Dependence of modern telecommunication signals transmitter with components separation output signal distortion level on the envelope path filter parameters," *T-Comm*, 2023. vol. 17, no.2, pp. 12-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-12-26.
- [14] D.C. Nguyen, O.V. Varlamov, "Simulation model for studying the operation of switching mode envelope elimination and restoration RF power amplifiers for a narrow-band load," *H&ES Research*. 2022. Vol. 14. No 2. P. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18.
- [15] O. V. Varlamov, "Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.11, pp. 4-20.
- [16] O. V. Varlamov, V. O. Varlamov, A. V. Dolgopyatova, "DRM broadcasting international network to create an information field in the Arctic region," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no.9, pp. 9-16.
- [17] O. V. Varlamov, A. A. Bychkova, "Basis of Technical Design and Development a Single-Frequency DRM Digital Broadcasting Network for Venezuel," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488396
- [18] O. Varlamov, V. Varlamov and A. Dolgopyatova, "Digital Radio Broadcasting Network in the Arctic Region," *2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Moscow, Russia, 2019, pp. 457-462. DOI: 10.23919/FRUCT.2019.8711933
- [19] V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, "Development of requirements to the individual units characteristics of a high-efficiency transmitter with separate amplification of single-sideband signals," *H&ES Research*. 2025. Vol. 17. No 4. P. 28-34. doi: 10.36724/2409-5419-2025-17-4-28-34.
- [20] V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, "Amplifier with separate components amplification high-frequency path computer model development and its specific distortions causes study," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 9. pp. 23-34. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-9-23-34.
- [21] V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, "Harmonic Filter for Envelope Elimination and Restoration Switching Mode Class D Transmitter," *2025 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH65814.2025.11220583.
- [22] V.N. Gromorushkin, "Developing a harmonic filter for short-wave switching transmitter," *T-Comm*, 2014, vol. 8, no. 10, pp. 20-23.
- [23] O.V. Varlamov, "Powerful broadband DC amplifiers for modulation path of transmitters with separate amplification," *T-Comm*, 2022. vol. 16, no.11, pp. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-4-14.
- [24] O. Varlamov, D.C. Nguyen, A. Grebennikov, "Broadband and Efficient Envelope Amplifier for Envelope Elimination and Restoration/Envelope Tracking Higher-Efficiency Power Amplifiers," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9173, Nov. 2022, doi: 10.3390/s22239173
- [25] D.C. Nguyen, V.N. Gromorushkin, O.V. Varlamov, "Theoretical comparison of different envelope elimination and restoration transmitter PWM modulator configurations to expand the possible antenna mismatch," *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 23. P. 9466. doi: 10.3390/s23239466
- [26] S.E. Grychkin, A.M. Zakharov, O.V. Varlamov, "Method for calculating the efficiency of a PWM modulator based on GaN FET transistors," *T-Comm*, 2023. vol. 17, no.9, pp. 19-27. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-9-19-27.
- [27] S.E. Grychkin, O.V. Varlamov, "High efficiency multi-level GaN FET PWM modulator for VHF digital broadcasting transmitters," *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.9, pp. 4-12. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-4-12.
- [28] O.V. Varlamov, "Maximum power of the HF antenna tuner switched by PIN diodes at load mismatch," *T-Comm*, 2020. vol. 14, no.10, pp. 26-32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-10-26-32.
- [29] R. Saal, *Handbook of Filter Design*; AEG-Telefunken: Berlin, Germany, 1979, 797 p.
- [30] K.A. Viktorov, O.V. Varlamov, V.N. Gromorushkin, "Device for UHF-therapy," Patent RU 2019206 C1, 15.09.1994.
- [31] DRM Introduction and Implementation Guide. Revision 2, September 2013. <http://www.drm.org/wp-content/uploads/2013/09/DRM-guide-artwork-9-2013-1.pdf>. Date of access 11.11.2025.

#### Information about author:

**Oleg V. Varlamov**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Radio Equipment and Circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3996-9156>

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В МОДЕЛЯХ ГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-23-30

Manuscript received 14 December 2025;

Accepted 16 February 2026

**Савотченко Сергей Евгеньевич,***Российский государственный геологоразведочный университет**имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия;**Московский технический университет связи и информатики,**Москва, Россия;**МИРЭА – Российский технологический университет,**Москва, Россия, [savotchenko@mirea.ru](mailto:savotchenko@mirea.ru)***Ключевые слова:** *волоконная оптика, оптоволокно, математическая модель, оптический волновод, волноводная мода, краевая задача, точное решение*

Работа посвящена аналитическому моделированию оптических градиентных волокон с изменяющимся в зависимости от радиального расстояния показателем преломления, широко применяемых в оптоволоконных телекоммуникационных системах. Рассматриваются цилиндрические волокна с круговым сечением. В основе рассматриваемых моделей таких градиентных волокон лежат радиальные профили показателя преломления. Предложены модели градиентных волокон с новой формой зависимости показателя преломления от радиуса волокна. Математическая формулировка моделей представляет собой краевую задачу для стационарного волнового уравнения (уравнения Гельмгольца) с переменными коэффициентами, которые определяются выбранными формами радиального профиля показателя преломления. Рассмотрены профили показателя преломления, допускающие нахождение точных аналитических решений сформулированных уравнений, описывающие поперечное распределение электрического поля в волокне. Предложена модель цилиндрического градиентного волокна с круговым сечением на основе нового градиентного профиля показателя преломления в сердцевине и в оболочке волокна. Для такого профиля найдено новое точное аналитическое решение сформулированной краевой задачи, которое является ограниченным и непрерывным в рассматриваемой волноводной области. Радиальное распределение поля в сердцевине выражается через функцию Уиттекера со вторым полуцелым индексом, а в оболочке волокна – через функцию Макдональда с нецелым индексом. Выявлены основные различия между поперечными распределениями, соответствующими предложенным обобщенным профилям и классическим параболическим профилем.

**Информация об авторе:**

**Савотченко Сергей Евгеньевич**, д.ф.-м.н. *Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе; Московский технический университет связи и информатики; МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, ORCID 0000-0002-7158-9145*

**Для цитирования:**

*Савотченко С.Е. Аналитические решения в моделях градиентных оптических волокон // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 23-30.*

**For citation:**

*S.E. Savotchenko, "Analytical solutions in the models of the graded-index optical fibers", T-Comm, 2026, vol. 20, no.2, pp. 23-30. (in Russian)*

## Введение

Современные средства телекоммуникаций немислимы без такого их структурного элемента как оптические волокна [1]. Оптоволоконные системы связи находят широкое применение в различных устройствах и технологиях [2, 3]. В связи с этим исследования по совершенствованию технологий оптоволоконной связи являются актуальными и востребованными [4].

Разработке и исследованию свойств оптических волокон различных типов посвящено большое количество литературы [5, 6]. Большое значение имеют работы по теоретическому моделированию оптоволоконных систем связи и передачи данных [7]. При этом важное место в таких исследованиях занимают проблемы получения не только численных результатов моделирования [8], но точных аналитических решений сформулированных уравнений [9-11].

При формулировке математических моделей оптических волокон учитываются многие факторы (материал, геометрия, структурная композиция). Самой распространенной формой являются цилиндрические оптические волокна с круговым сечением [12]. Наиболее важным показателем, отражающим характерные свойства модельных волокон, является показатель преломления материала, из которого изготовлено волокно. В зависимости от его вида выделяют два самых распространенных класса волокон: ступенчатые – с постоянным показателем преломления в различных структурных участках волокна, а также градиентные – показатель преломления в определенных структурных участках волокна зависит от его радиуса (то есть расстояния от оси симметрии цилиндрического волокна) [13].

Типичной структурой цилиндрического волокна является сердцевина с показателем преломления  $n_{co}$ , вокруг которой имеется оболочка с другим показателем преломления  $n_{cl}$  (Рис.1). В градиентных волокнах эти показатели преломления, или один из них, являются функциями от расстояния от центра волокна  $r$  (эта величина играет роль полярного радиуса в цилиндрических координатах) [14].

В зависимости от выбора этих функций может появиться возможность найти точное решение краевой задачи для волнового уравнения, описывающее стационарные волноводные моды моделируемого оптического волокна. Наиболее хорошо изученным случаем является параболическая зависимость от квадрата показателя преломления сердцевины в виде [15]

$$n_{co}^2(r) = n_{co}^2 \left( 1 - \Delta_{co} \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right), r < a, \quad (1)$$

где  $a$  – радиус сердцевины волокна, и

$$\Delta_{co} = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{n_{co}^2} \quad (2)$$

Показатель преломления оболочки считается постоянным ( $n_{cl} = \text{const}$ ,  $r > a$ ). Также в (1) величина  $n_{co}$  обозначает константу. Такая форма функции (1) допускает получения точного аналитического решения волнового уравнения, выражающегося через различные цилиндрические функции Бесселя [16].

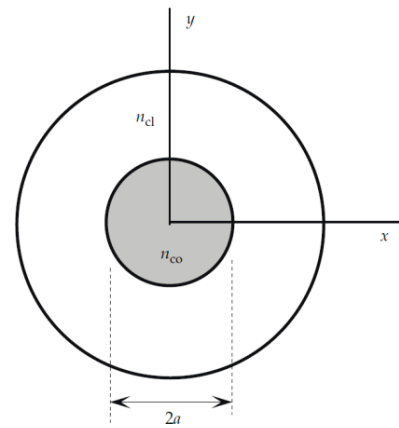


Рис. 1. Сердцевина и оболочка оптического волокна

Также широко распространенным обобщением формы профиля показателя преломления (1) при моделировании свойств градиентных волокон является функция в виде [17]

$$n_{co}^2(r) = n_{co}^2 \left( 1 - \Delta_{co} \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right), r < a, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – параметр профиля (при  $\alpha=2$  из (3) получается параболический профиль (1)). Выражения (3) иногда называют  $\alpha$ -профилем.

Помимо профилей (1) и (3) рассматриваются и другие, в том числе и нелинейные, когда показатель преломления зависит от интенсивности света  $I$ , то есть  $n=n(I)$  [18, 19]. Однако в цилиндрических волноводах такие формы профиля исследуются только численными методами [12].

В данной работе рассматриваются профили показателя преломления, отличные от параболического в сердцевине и с переменным показателем преломления оболочки, которые допускают нахождения точных аналитических решений волнового уравнения, описывающего стационарные волноводные моды. Использование таких профилей в моделях оптических градиентных волноводов и, в частности, волокон, позволяет избежать численного решения уравнений (которые, априори, приближенные), а также наглядно проанализировать их дисперсионные свойства [20].

## 1 Основные модельные уравнения

При моделировании оптических волноводных структур в первую очередь следует определить геометрию рассматриваемого волновода и свойства материалов, из которых он состоит. Рассмотрим цилиндрическое волокно кругового сечения (рис. 1) с сердцевиной радиуса  $a$ , которое приблизительно будет считаться много меньше радиуса волокна. Такое допущение при формулировке математической модели возможно, если считать, что интенсивность света в оболочке должна быстро убывать с ростом расстояния от сердцевины. Другими словами, считается, что поле слабо проникает в материал оболочки и быстро в нем затухает. Также будем рассматривать только немагнитные материалы без диэлектрических потерь.

Несмотря на то, что в реальных волокнах присутствуют диэлектрические потери, известно, что при определенных длинах волн/частотах лазерные импульсы могут распространяться практически без потерь, то есть их можно считать пренебрежительно малыми по сравнению с интенсивностью входящего излучения.

Показатель преломления волокна представим в виде:

$$n = \begin{cases} n_{co}, & r < a, \\ n_{cl}, & r > a. \end{cases} \quad (4)$$

В (4) если оба показателя преломления  $n_{co}$  сердцевины  $n_{cl}$  оболочки постоянные величины, то модель будет описывать ступенчатое волокно, а если хотя бы один из них будет зависеть от пространственных координат, в частности, от полярного радиуса  $r$ , то модель будет описывать градиентное волокно.

Будем считать, что магнитная проницаемость материала волокна везде одинакова и равна  $\mu_0$ . Будем рассматривать только электрическую составляющую электромагнитного поля. Тогда уравнения Максвелла для напряженностей электрического и магнитного полей позволяют получить волновое уравнение для вектора напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  в виде

$$\Delta \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mu_0 n^2 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Для монохроматической волны при использовании представления  $\mathbf{E} = \mathbf{E} \exp(-i\omega t)$ , где  $\omega$  – частота,  $t$  – время, волновое уравнение (5) переходит в уравнение Гельмгольца

$$\Delta \mathbf{E} + (kn)^2 \mathbf{E} = 0, \quad (6)$$

где  $k = \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2$  – волновое число.

Поскольку оператор Лапласа представим в виде

$$\Delta = \Delta_{\perp} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (7)$$

где  $\Delta_{\perp}$  – поперечная часть оператора Лапласа, а волна распространяется вдоль оси  $z$  (оси симметрии цилиндрического волокна с круговым сечением), то при использовании представления  $\mathbf{E} = \mathbf{E} \exp(i\beta z)$ , где  $\beta$  – константа распространения, из уравнения (6) получается

$$\Delta_{\perp} \mathbf{E} + (k^2 n^2 - \beta^2) \mathbf{E} = 0. \quad (8)$$

Если выделить поперечную составляющую электрического поля  $\mathbf{E}_{\perp}$ , то его можно представить в виде

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{e}_z E_z, \quad (9)$$

где  $\mathbf{e}_z$  – единичный вектор вдоль оси  $z$ . Как известно, достаточно определить  $z$ -ую компоненту полей [14]. Поэтому далее будем рассматривать уравнения только для компоненты  $E_z$ .

В силу цилиндрической симметрии волокна целесообразно перейти к цилиндрическим координатам  $(r, \varphi, z)$ , причем поперечная часть оператора Лапласа будет:

$$\Delta_{\perp} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}. \quad (10)$$

В парааксиальном приближении [14, 21] уравнение (8) для компоненты поля в цилиндрических координатах примет вид

$$\Delta_{\perp} E_z + (k^2 n^2 - \beta^2) E_z = 0. \quad (11)$$

В силу цилиндрической симметрии решение уравнение (11) должно быть периодическим по угловой координате  $\varphi$ , поэтому можно использовать представление

$$E_z(r, \varphi) = u(r) \exp(im\varphi), \quad (12)$$

где  $m = 0, 1, \dots$ , – целочисленный параметр, определяющий порядок волноводной моды,  $u(r)$  – радиальная часть напряженности электрического поля (радиальное распределение), которое при заданном значении  $m$  соответствует волноводной моде порядка  $m$ . Подстановка (12) в (11) с учетом (10) позволяет получить уравнение:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \left( k^2 n^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) u = 0. \quad (13)$$

Уравнение (13) представляет собой основное уравнение теории оптических волноводов, используемое при моделировании цилиндрических волокон кругового сечения.

Поскольку в волокне все компоненты полей должны быть непрерывными, то на границе сердцевины при  $r=a$  для радиального распределения поля должны выполняться условия сопряжения:

$$u(a-0) = u(a+0), \quad (14)$$

$$u'(a-0) = u'(a+0), \quad (15)$$

Здесь в (14) и (15) и далее понимаются левосторонние и правосторонние пределы, соответственно:  $u(a \pm 0) = \lim_{r \rightarrow a \pm 0} u(r)$  и  $u'(a \pm 0) = \lim_{r \rightarrow a \pm 0} u'(r)$ , а штрих обозначает производную по  $r$ .

Поскольку мы считаем, что  $a \ll R$ , где  $R$  радиус волокна, то уравнение (13) решается в области  $0 < r < +\infty$ , причем его решение должно быть всюду ограниченным, и в частности удовлетворять условию на бесконечности:

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} u(r) = 0, \quad (16)$$

которое часто записывают в эквивалентной форме как:  $u(r) \rightarrow 0, r \rightarrow \infty$ .

Таким образом, математическая формулировка модели для определения поперечного распределения электрического поля в цилиндрическом волокне кругового сечения представляет собой краевую задачу сопряжения для уравнения (13) со скачкообразным изменением коэффициента в соответствие с (4). Постановка задачи: требуется найти непрерывное ограниченное решение уравнения (13), удовлетворяющее граничным условиям (14)-(16). Для ее решения необходимо конкретизировать зависимость показателя преломления  $n$  от радиуса  $r$  в (4).

Следует отметить, что в уравнении (13) показатель преломления считается зависящим от одной пространственной координаты, а именно, от полярного радиуса  $r$ . Это возможно в случае цилиндрической симметрии рассматриваемой системы. Зависимость от радиуса имеет место в том числе и для ступенчатых волокон, поскольку в разных участках сечения

волокна значения показателя преломления различны, хотя и постоянные в определенных его зонах. Другими словами, значения показателя преломления меняются скачкообразно при переходе из одной структурной зоны ступенчатого волокна в другую. Следовательно, коэффициент в уравнении (13) имеет скачок, то есть рассматриваемая модель волокна основана на уравнении с разрывными коэффициентами.

Однако в случае ступенчатых волокон уравнение (13) представляется в виде нескольких уравнений с постоянными коэффициентами на различных структурных участках волокна. Соответствующие решения «сшиваются» граничными условиями на границах структурных элементов волокна. Решения таких задач для ступенчатых волокон представляет собой простую задачу.

Для градиентных волокон основная сложность при аналитическом моделировании связана с нахождением решения уравнения с переменными коэффициентами. Если существует точное аналитическое решение уравнения с переменными коэффициентами, то оно, как правило, выражается через специальные функции математической физики. Причем в случае нахождения решения рассматриваемой краевой задачи для таких функций необходимо, чтобы они были непрерывны и ограничены в области поиска решения. А поскольку требуется выполнения условия непрерывности всех компонент поля, то рассматриваемая компонента электрического поля как решение краевой задачи, должна характеризоваться и непрерывной производной в области поиска решения. Другими словами, решение краевой задачи должно быть гладким.

Поскольку решения краевой задачи (13)-(16) зависят от целочисленной переменной  $m$ , то их можно говорить, что они описывают волноводные моды порядка  $m$ . Волноводная мода нулевого порядка (при  $m=0$ ) часто называется фундаментальной или основной.

Также следует отметить, что константа распространения изначально считается неизвестной в задачах моделирования волноводов. Она определяется в ходе ее решения и, как правило, выражается через величины, характеризующие геометрические и оптические свойства материалов волноводной структуры. Поэтому сформулированная краевая задача (13)-(16) модели волокна фактически представляет собой задачу на собственные значения. В этом контексте волноводные моды являются собственными функциями задачи, а константа распространения данной моды представляет собой собственное значение. Поскольку для каждого порядка волноводной моды они различны, то можно говорить о дискретном спектре собственных значений, то есть константы распространения.

## 2 Радиальные распределения поля для различных градиентов показателя преломления

Для ступенчатых волокон  $n_{co}$  и  $n_{cl}$  в (4) считаются константами, не зависящими от радиуса  $r$ . В этом случае уравнение (13) примет может быть представлено в виде двух уравнений с постоянными коэффициентами на различных участках (сечениях) волокна:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \left( k^2 n_{co}^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) u = 0, \quad r < a. \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \left( k^2 n_{cl}^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) u = 0, \quad r > a. \quad (18)$$

Уравнение (17) описывает поперечное распределение компоненты электрического поля в сердцевине волокна, а уравнение (18) распределение этого поля в оболочке. Оба этих уравнения относятся к уравнениям Бесселя. Уравнение (17) имеет два линейно независимых решения, описываемых цилиндрическими функциями первого и второго рода, а уравнение (18) имеет два линейно независимых решения, описываемых цилиндрическими функциями мнимого аргумента первого и второго рода (или модифицированными цилиндрическими функциями).

Для случая ступенчатого волокна хорошо известно решение задачи (14)-(18) при условии, что  $n_{cl} < \beta/k < n_{co}$  [21]:

$$u(r) = u_a \begin{cases} \frac{J_m(qr)}{J_m(qa)}, & r < a, \\ \frac{K_m(\kappa r)}{K_m(\kappa a)}, & r > a, \end{cases} \quad (19)$$

где  $u_a$  – амплитуда поля на границе сердцевина-обкладка,

$$q^2 = (n_{co}k)^2 - \beta^2, \quad (20)$$

$$\kappa^2 = \beta^2 - (n_{cl}k)^2, \quad (21)$$

$J_m(x)$  – функция Бесселя первого рода,  $K_m(x)$  – функция Макдональда (модифицированная функция Бесселя / функция Бесселя мнимого аргумента второго рода).

При нахождении решения (19) было учтено, что в области  $0 < r < a$  (в частности, в начале координат), ограниченной является только функция Бесселя первого рода, в области  $r > a$  (в частности, на бесконечности), ограниченной является только функция Макдональда, которая асимптотически приближается к нулю на бесконечности, то есть удовлетворяет условию (16).

Решение (19) удовлетворяет условию (14) непрерывности радиального распределения поля на границе сердцевина-обкладка. Для того, чтобы полученное решение (19) удовлетворяло условию (15) непрерывности производной радиального распределения поля на границе сердцевина-обкладка (то есть решение (19) должно быть гладким), следует его подставить в (15) и получить соотношение, связывающее константу распространения с параметрами задачи. В результате такой подстановки получается, что константа распространения определяется как положительное решение уравнения:

$$q \frac{J'_m(qa)}{J_m(qa)} = \kappa \frac{K'_m(\kappa a)}{K_m(\kappa a)} \quad (22)$$

Данное уравнение, определяющее зависимость константы распространения от физических и геометрических характеристик волокна, называют дисперсионным. Ясно, что данное трансцендентное уравнение может быть решено только численными методами.

Рассмотрим теперь градиентное волокно с показателем преломления в виде:

$$n = \begin{cases} n_{co}, r < a, \\ n_{cl} \left( 1 - \Delta_{cl} \left( \frac{a}{r} \right)^2 \right)^{1/2}, r > a, \end{cases} \quad (23)$$

где  $\Delta_{cl}$  – параметр плавности перехода значения показателя преломления. В такой модели сердцевина характеризуется постоянным значением показателем преломления  $n_{co}$ , а в обкладке показатель преломления монотонно убывает от значения  $n_{co}$  до  $n_{cl}$ .

Предложенный градиентный профиль показателя преломления (23) представляет собой плавный, то есть более реалистичный, переход от одного значения показателя преломления в сердцевине к другому в обкладке.

В такой постановке задачи с профилем (23) уравнение (17) остается неизменным, а вместо (18) получится уравнение:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \left( \kappa^2 + n_{cl}^2 k^2 \Delta_{cl} \left( \frac{a}{r} \right)^2 + \frac{m^2}{r^2} \right) u = 0, r > a. \quad (24)$$

Ограниченное решение этого уравнения, удовлетворяющее условию на бесконечности (16) также выражается через функцию Макдональда, но с другим порядком, который уже не будет в общем случае целым числом.

Следовательно, решение краевой задачи для уравнений (17) и (24) при условиях (14)-(16) имеет вид:

$$u(r) = u_a \begin{cases} \frac{J_m(qr)}{J_m(qa)}, r < a, \\ \frac{K_\nu(\kappa r)}{K_\nu(\kappa a)}, r > a, \end{cases} \quad (25)$$

где

$$\nu = \sqrt{m^2 + \Delta_{cl}(akn_{cl})^2}. \quad (26)$$

Данное решение краевой задачи получено при условии при условии, что  $n_{cl} < \beta/k < n_{co}$ . Очевидным образом при  $\Delta_{cl} \rightarrow 0$  решение (25) переходит в известное решение (19), так как из (26) следует, что  $\nu \rightarrow m$ . Отличие решения (25) от (19) заключается в том, что индекс функции Макдональда, определяемый (26), является нецелым числом, и при положительном значении параметра плавности перехода значения показателя преломления  $\Delta_{cl}$  превосходит порядок волноводной моды  $m$  ступенчатого волокна.

Решение (25) удовлетворяет условию (14) непрерывности радиального распределения поля на границе сердцевина-обкладка. Для того, чтобы полученное нами решение (25) удовлетворяло условию (15) непрерывности производной радиального распределения поля на границе сердцевина-обкладка (то есть решение (25) должно быть гладким в области поиска решения), следует его подставить в (15) и получить соотношение, связывающее константу распространения с параметрами задачи. В результате такой подстановки получается, что константа распространения определяется как положительное решение уравнения:

$$q \frac{J'_m(qa)}{J_m(qa)} = \kappa \frac{K'_\nu(\kappa a)}{K_\nu(\kappa a)}, \quad (27)$$

которое при  $\Delta_{cl} \rightarrow 0$  переходит в дисперсионное уравнение (22) для ступенчатого волокна [12, 14, 21].

Также как и дисперсионное уравнение (22), данное трансцендентное уравнение (27) может быть решено только численными методами. Для упрощения численного анализа уравнения (27) можно привести к виду

$$s \frac{J'_m(s)}{J_m(s)} = \sqrt{A^2 - s^2} \frac{K'_\nu(\sqrt{A^2 - s^2})}{K_\nu(\sqrt{A^2 - s^2})}, \quad (28)$$

где обозначено  $A^2 = (ak)^2(n_{co}^2 - n_{cl}^2)$  и  $s = qa$  – новая неизвестная. Здесь учтено, что в силу (20) и (21) выполняется соотношение:  $\kappa^2 = k^2(n_{co}^2 - n_{cl}^2) - q^2$ .

Анализ показал, что дисперсионное уравнение (28) имеет корни в интервале  $0 < s < A$ , которые зависят от трех параметров, включая порядок моды, то есть  $s_m = s_m(\nu, A)$ . Следовательно, получив решение дисперсионного уравнения (28), можно записать дискретный спектр собственных значений краевой задачи для уравнений (17) и (24) при условиях (14)-(16), определяющий допустимые значения константы распространения, при которых могут возбуждаться волноводные моды соответствующего порядка:

$$\beta_m^2 = (n_{co}k)^2 - (s_m/a)^2. \quad (29)$$

Таким образом, найдено точное решение краевой задачи для уравнений (17) и (24) при условиях (14)-(16): собственные функции определяются (25), а собственные значения – (29).

Следующим шагом дальнейшего обобщения градиентного профиля (23) может быть учет зависимости показателя преломления сердцевины от радиуса. Поскольку самым распространенным видом такой зависимости показателя преломления в градиентных волокнах является параболическая [15, 22-24], то рассмотрим теперь модель, в которой показатель преломления определяется функцией вида:

$$n^2 = \begin{cases} n_{co}^2 \left( 1 - \Delta_{co} \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right), r < a, \\ n_{cl}^2 \left( 1 - \Delta_{cl} \left( \frac{a}{r} \right)^2 \right), r > a. \end{cases} \quad (30)$$

В такой постановке задачи с учетом профиля (30) уравнение (24) остается неизменным, а вместо (17) получится уравнение:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \left( n_{co}^2 k^2 - \beta^2 - n_{co}^2 k^2 \Delta_{co} \left( \frac{r}{a} \right)^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) u = 0, r > a. \quad (31)$$

Общее решение уравнения (31) может быть записано через различные специальные функции, например, через гипергеометрические функции или конфлюэнтные функции Хойна [25]. Однако его можно привести заменой переменных к уравнению Уиттрекера, которое имеет два линейно независимых решения, называемых функциями Уиттекера, причем только одна из них ограничена в начале координат.

С учетом этого решение краевой задачи для уравнений (24) и (31) при условиях (14)-(16) можно записать в виде:

$$u(r) = u_a \begin{cases} \frac{a}{r} M_{l,m/2}(pr^2), r < a, \\ \frac{K_\nu(\kappa r)}{K_\nu(\kappa a)}, r > a, \end{cases} \quad (32)$$

где  $M_{\alpha,\beta}(x)$  – функция Уиттекера [25],

$$l = \frac{a(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)}{4n_{co}\sqrt{\Delta_{co}}}, \quad (33)$$

$$p = \frac{n_{co}\sqrt{\Delta_{co}}}{a}. \quad (34)$$

При нахождении решения (32) было учтено, что в области  $0 < r < a$  (в частности, в начале координат), ограниченной является только функция Уиттекера  $M_{\alpha,\beta}$ , а в области  $r > a$  (в частности, на бесконечности), ограниченной является только функция Макдональда, которая асимптотически приближается к нулю на бесконечности, то есть удовлетворяет условию (16).

Решение (32) удовлетворяет условию (14) непрерывности радиального распределения поля на границе сердцевина-обкладка. Для того, чтобы полученное нами решение (32) удовлетворяло условию (15) непрерывности производной радиального распределения поля на границе сердцевина-обкладка (то есть решение (32) должно быть гладким в области поиска решения), следует его подставить в (15) и получить соотношение, связывающее константу распространения с параметрами задачи. В результате такой подстановки получается, что константа распространения определяется как положительное решение уравнения (то есть константа распространения определяется как положительное решение дисперсионного уравнения):

$$q_{cor} = q_{cl}, \quad (35)$$

где обозначено

$$q_{cor} = pa - \frac{1+2l}{a} + \frac{m+1+2l}{a} \frac{M_{l+1,m/2}(pr^2)}{M_{l,m/2}(pa^2)}, \quad (36)$$

$$q_{cl} = \frac{v}{a} - \kappa \frac{K_{v+1}(\kappa r)}{K_v(\kappa a)}. \quad (37)$$

Таким образом, найдено точное решение краевой задачи для уравнений (24) и (31) при условиях (14)-(16): собственные функции определяются (32), а собственные значения – корнями дисперсионного уравнения (35). Дисперсионное уравнение (35) может быть решено численными методами. Его анализ показал, что константа распространения  $\beta$  монотонно возрастает при увеличении радиуса ядра волокна  $a$ .

Анализ радиального распределения волноводных мод, определяемого найденным решением краевой задачи (32), показал, что наибольшая интенсивность поля для фундаментальной моды (при  $m=0$ ) наблюдается на оси симметрии волокна. Для волноводных мод старших порядков начиная с  $m=1, 2, \dots$ , интенсивность поля резко падает (вплоть до нулевого значения в зависимости от радиуса сердцевинной  $a$ ). Максимальное значение интенсивности поля в этих случаях наблюдается в сердцевине при  $0 < r < a$ . Высота максимума увеличивается с ростом порядка волноводной моды.

Отметим, что при  $\Delta_{cl} \rightarrow 0$  решение (32) переходит с учетом замены в нем  $v \rightarrow m$  в известное решение для параболического профиля сердцевинной и постоянного показателя преломления обкладки [26]. Был проведен сравнительный анализ профилей поперечного распределения для того простого параболического профиля и предложенного нами обобщенного градиентного профиля (29).

В результате анализа было установлено, что интенсивность света в центре сердцевинной волокна в случае предлагаемого профиля (30) выше, чем в случае классического параболического профиля. То же самое связано с глубиной проникновения электрического поля в обкладку. При этом распределение света, соответствующее профилю (30), характеризуется более высокой интенсивностью, как в центре волокна, так и в обкладке, в отличие от известного параболического профиля с крутой долиной [22-24, 26]. Однако разница в уровнях интенсивности света для таких профилей показателя преломления становится практически неразличимой на расстоянии около половины радиуса волокна от его центра и вблизи границы сердцевина-обкладка в оболочке.

#### 4 Выводы

Сформулированы модели ряда градиентных волокон с новой формой зависимости показателя преломления от радиуса волокна. Математические модели представляют собой краевые задачи для стационарного волнового уравнения с переменным коэффициентом, который определяется выбранным зависимостью показателя преломления. Были подобраны такие профили показателя преломления, которые позволили получить точные аналитические решения сформулированных уравнений, описывающие поперечное распределение электрического поля в волокне. Предложена модель цилиндрического градиентного волокна с круговым сечением на основе нового профиля показателя преломления, для которого найдено точное аналитическое решение соответствующей краевой задачи.

Выявлены основные различия между поперечными распределениями, соответствующими предложенным обобщенным профилям и классическим параболическим профилем с острыми долинами в профиле показателя преломления. Установлено, что распределение света, рассчитанное в предложенной обобщенной модели, характеризуется более высокой интенсивностью как в центре волокна, так и в обкладке, в отличие от известного профиля с острыми долинами. Следовательно, предложенный обобщенный (более плавный) профиль может применяться при моделировании оптических свойств реальных волокон в отличие от классического параболического профиля с острыми долинами.

Использование предлагаемого профиля позволяет получить более реалистичную оценку характеристик дисперсионных свойств оптических волокон. Проведенные исследования могут найти применение при разработке и совершенствовании оптоволоконных систем связи на основе градиентах оптических волокон с определенными дисперсионными свойствами.

#### Литература

1. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швыдков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ВЭЛКОМ, 2003. 288 с.
2. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники. М.: Изд-во МГУЛ, 2008. 332 с.
3. Йоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Экотрендз, 2002. 282 с.
4. Koos C. Nanophotonic Devices for Linear and Nonlinear Optical Signal Processing. Karlsruhe: Karlsruhe Institut Fur Technologie, 2014. 226 p.

5. *БейлиД., РайтЭ.* Волоконная оптика: теория и практика. М.: Кудиц-Пресс, 2008. 320 с.
6. *Желтиков А.М.* Оптика микроструктурированных волокон. М.: Наука, 2004. 352 с.
7. *Базаров Е.Н., Бурков В.Д., Шатров А.Д.* Теоретические основы волоконно-оптической техники. М.: Изд-во МГУЛ, 2004. 203 с.
8. *Шумкова Д.Б., Левченко А.Е.* Специальные волоконные световоды. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 178 с.
9. *Savotchenko S.E.* Features of dispersion properties of a waveguide with a modified Kerr weak nonlocal nonlinearity coated with a metal thin film // *Optical and Quantum Electronics*. 2024. Vol. 56. P. 1159. DOI: 10.1007/s11082-024-07123-x.
10. *Savotchenko S.E.* Features of self-confinement of the linearly polarized waves in a nonlinear fiber with a light induced core // *Romanian Journal in Physics*. 2024. Vol. 69. № 3-4. P. 201. DOI: 10.59277/RomJPhys.2024.69.201.
11. *Savotchenko S.E.* Analytical solutions describing new features of guided wave modes in circular fiber consisting of a constant-index core and a graded-index cladding with saturation // *Romanian Journal in Physics*. 2024. Vol. 69. N 5-6. P. 202. DOI: 10.59277/RomJPhys.2024.69.202.
12. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
13. *Agrawal G.P.* Physics and Engineering of Graded-Index Media. New York: Cambridge University Press, 2023. 348 p. DOI: 10.1017/9781009282086.
14. *Chen C.-L.* Foundations for guided-wave optics. New York: John Wiley & Sons, 2005. 462 p. DOI: 10.1002/0470042222.
15. *Ikuno H.* Guided Modes of the Graded-Index Optical Fiber With a Parabolic-Index Core. In: *Optical Waveguide Sciences. Proceedings of the International Symposium*. Dordrecht: Springer, 1983, pp. 195-201. DOI: 10.1007/978-94-009-6875-2\_22.
16. *Hashimoto M., Nemoto S., Makimoto T.* Analysis of Guided Waves Along the Cladded Optical Fiber: Parabolic-Index Core and Homogeneous Cladding // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1977. Vol. 25, pp. 11-17. DOI: 10.1109/TMTT.1977.1129024.
17. *Fundamentals of Optical Waveguides*. Cambridge: Elsevier Inc., Academic Press, 2022. DOI: 10.1016/C2017-0-02432-1.
18. *Розанов Н.Н.* Нелинейная оптика. Ч. 1. Уравнения распространения излучения и нелинейный отклик среды. СПб.: Изд-во СПбГУИТМО, 2008. 95 с.
19. *Беспрозванных В.Г., Первадчук В.П.* Нелинейная оптика. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. 200 с.
20. *Gladkikh V.A., Vlasenko V.D.* Calculation of parameters (propagation constant, phase and group velocities) of a graded-index optical fiber // *Computer Optics*. 2025. Vol. 49. № 1, pp. 30-35. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1521.
21. *Adams M.J.* An Introduction to Optical Waveguides. Chichester: Wiley, 1981. 418 p.
22. *Lachance R., Blanger P.* Modes in Divergent Parabolic Graded-Index Optical Fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 1991. Vol. 9, pp. 1425-1430. DOI: 10.1109/50.97628.
23. *Krapez J.-C.* Multipurpose S-shaped solvable profiles of the refractive index: application to modeling of antireflection layers and quasi-crystals // *J. Opt. Soc. Am. A* 2018. Vol. 35, pp. 1039-1052. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001039.
24. *Liu Y., Wang Y., Geng W., Zhao W., Zhang H., Zhang W., Pan Z., Yue Y.* Parabolic-Index Ring-Core Fiber Supporting High-Purity Orbital Angular Momentum Modes // *Sensors (Basel)*. 2023. Vol. 23, №7, pp. 3641. DOI: 10.3390/s23073641.
25. *Брычков Ю. А., Прудников А. П.* Функции Уиттекера // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. URL: <https://bigenc.ru/c/funktsii-uittekera-6d1e96/?v=3785531>. (Дата публикации: 23.05.2022)
26. *Zubia J., Aldabaldetretu G., Durana G., Illarramendi M.* Geometric optics analysis of inverted graded index fibers // *Journal of Optics*. 2022. Vol. 24. P. 115602. DOI: 10.1088/2040-8986/ac939a

## ANALYTICAL SOLUTIONS IN THE MODELS OF THE GRADED-INDEX OPTICAL FIBERS

**Sergey E. Savotchenko**, *Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia*  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia;*  
*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, [savotchenko@mirea.ru](mailto:savotchenko@mirea.ru)*

### Abstract

This paper deals with the analytical modeling of graded-index optical fibers with a refractive index varying with radial distance widely used in fiber optic telecommunication systems. Cylindrical fibers with a circular cross section are considered. Radial refractive index profiles underlie the models for such fiber gradients. Models of graded-index fibers with a new form of refractive index dependence on fiber radius are proposed. The mathematical formulation of the models represents a boundary value problem for a stationary wave equation with variable coefficients determined by the selected forms of the radial refractive index profile. Refractive index profiles are considered that allow finding exact analytical solutions to the formulated equations describing the transverse distribution of the electric field in the fiber. A model of a cylindrical graded-index fiber with a circular cross section is proposed based on a new graded-index profile in the fiber core and cladding. A new exact analytical solution to the corresponding boundary value problem is found for this profile. The radial field distribution in the core is expressed using the Whittaker function with a second half-integer index, while in the fiber cladding it is expressed using the modified Bessel function of the second kind with a non-integer index. The main differences between the transverse distributions corresponding to the proposed generalized profile and the classical parabolic profile are identified.

**Keywords:** fiber optics, optical fiber, mathematical model, optical waveguide, waveguide mode, boundary value problem, exact solution

## References

- [1] A.V. Listvin, V.N. Listvin, D.V. Shvydkov, "Optical Fibers for Communication Lines", Moscow; VELCOM, 2003, 288 p. (In Russian)
- [2] V.D. Burkov, G. A. Ivanov, "Scientific Foundations of Creating Fiber-Optic Devices and Systems", Moscow: MGUL Publishing House, 2008, 332 p. (In Russian)
- [3] D. V. Yorgachev, O. V. Bondarenko, "Fiber-Optic Cables and Communication Lines", Moscow: Ecotrends, 2002, 282 p. (In Russian).
- [4] C. Koos, "Nanophotonic Devices for Linear and Nonlinear Optical Signal Processing", Karlsruhe: KarlsruheInstitut Fur Technologie, 2014, 226 p.
- [5] D. Bailey, E. Wright, "Fiber Optics: Theory and Practice", Moscow: Kudits-Press, 2008, 320 p. (In Russian)
- [6] A. M. Zheltikov, "Optics of Microstructured Fibers", Moscow: Nauka, 2004, 352 p. (In Russian)
- [7] E. N. Bazarov, V. D. Burkov, A. D. Shatrov, "Theoretical Foundations of Fiber-Optic Technology. Moscow: Publishing House of Moscow State University of Forestry", 2004, 203 p. (In Russian)
- [8] D. B. Shumkova, A. E. Levchenko, "Specialized Fiber Light Guides". Perm: Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2011, 178 p. (In Russian)
- [9] S.E. Savotchenko, "Features of dispersion properties of a waveguide with a modified Kerr weak nonlocal nonlinearity coated with a metal thin film", *Optical and Quantum Electronics*, 2024, vol. 56, pp. 1159. DOI: 10.1007/s11082-024-07123-x.
- [10] S.E. Savotchenko, "Features of self-confinement of the linearly polarized waves in a nonlinear fiber with a light induced core", *Romanian Journal in Physics*, 2024, vol. 69, no. 3-4, pp. 201. DOI: 10.59277/RomJPhys.2024.69.201.
- [11] S.E. Savotchenko, "Analytical solutions describing new features of guided wave modes in circular fiber consisting of a constant-index core and a graded-index cladding with saturation", *Romanian Journal in Physics*, 2024, vol. 69, no. 5-6, P. 202. DOI: 10.59277/RomJPhys.2024.69.202.
- [12] G.P. Agrawal, "Nonlinear fiber optic", 3rd ed., San Diego: Academic Press, 2001, 467 p.
- [13] G.P. Agrawal, "Physics and Engineering of Graded-Index Media", New York: Cambridge University Press, 2023, 348 p. DOI: 10.1017/9781009282086.
- [14] C.-L. Chen, "Foundations for guided-wave optics", New York: John Wiley & Sons, 2005. 462 p. DOI: 10.1002/0470042222.
- [15] H. Ikuno, "Guided Modes of the Graded-Index Optical Fiber With a Parabolic-Index Core", *Optical Waveguide Sciences. Proceedings of the International Symposium*, Dordrecht: Springer, 1983, pp. 195-201. DOI: 10.1007/978-94-009-6875-2\_22.
- [16] M. Hashimoto, S. Nemoto, T. Makimoto, "Analysis of Guided Waves Along the Cladded Optical Fiber: Parabolic-Index Core and Homogeneous Cladding", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1977, vol. 25, pp. 11-17. DOI: 10.1109/TMTT.1977.1129024.
- [17] Fundamentals of Optical Waveguides. Cambridge: Elsevier Inc., Academic Press, 2022. DOI: 10.1016/C2017-0-02432-1.
- [18] N.N. Rozanov, "Nonlinear Optics. Part I. Radiation Propagation Equations and Nonlinear Response of the Medium", St. Petersburg: SPbGUITMO Publishing House, 2008, 95 p. (In Russian).
- [19] V.G. Besprozvannykh, V.P. Pervadchuk, "Nonlinear Optics", Perm: Perm State Technical University Publishing House, 2011, 200 p. (In Russian)
- [20] V.A. Gladkikh, V.D. Vlasenko, "Calculation of parameters (propagation constant, phase and group velocities) of a graded-index optical fiber", *Computer Optics*, 2025, vol. 49, no. 1, pp. 30-35. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1521.
- [21] M.J. Adams, "An Introduction to Optical Waveguides," Chichester: Wiley, 1981, 418 p.
- [22] R. Lachance, P. Blanger, "Modes in Divergent Parabolic Graded-Index Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, 1999, vol. 9, pp. 1425-1430. DOI: 10.1109/50.97628.
- [23] J.-C. Krapez, "Multipurpose S-shaped solvable profiles of the refractive index: application to modeling of antireflection layers and quasicrystals", *J. Opt. Soc. Am. A*, 2018, vol. 35, pp. 1039-1052. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001039.
- [24] Y. Liu, Y. Wang, W. Geng, W. Zhao, H. Zhang, W. Zhang, Z. Pan, Y. Yue, "Parabolic-Index Ring-Core Fiber Supporting High-Purity Orbital Angular Momentum Modes", *Sensors (Basel)*, 2023, vol. 23, no. 7, pp. 3641. DOI: 10.3390/s23073641.
- [25] Yu. A. Brychkov, A. P. Prudnikov, "Whittaker functions", *Great Russian Encyclopedia: scientific and educational portal*. <https://bigenc.ru/c/funktsii-uitteker-a-6d1e96/?v=3785531>. (In Russian)
- [26] J. Zubia, G. Aldabaldetrekua, G. Durana, M. Illarramendi, "Geometric optics analysis of inverted graded index fibers", *Journal of Optics*, 2022, vol. 24, pp. 115602. DOI: 10.1088/2040-8986/ac939a

## Information about author:

Sergey E. Savotchenko, Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze; Moscow Technical University of Communications and Informatics; MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, ORCID 0000-0002-7158-9145

# ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

**Ефанов Дмитрий Викторович**,  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,  
[TrES-4b@yandex.ru](mailto:TrES-4b@yandex.ru)

**Елина Есения Игоревна**,  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,  
[eseniya-elina@mail.ru](mailto:eseniya-elina@mail.ru)

**Кашталинский Александр Сергеевич**,  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,  
[ask1188@mail.ru](mailto:ask1188@mail.ru)

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-31-41

Manuscript received 11 December 2025;  
Accepted 14 February 2026

**Ключевые слова:** железнодорожный переезд; прогнозирование временных параметров работы переезда; интеллектуальная транспортная система; информационное сопряжение систем прогнозирования временных параметров работы переезда и интеллектуальных транспортных систем.

Предложено осуществлять информационное сопряжение систем диагностирования и прогнозирования на железнодорожном транспорте с интеллектуальными транспортными системами на автомобильных дорогах. Это позволит учесть действующие и прогнозируемые значения времен срабатывания устройств ограждения на железнодорожных переездах для оптимизации движения на автомобильных дорогах. Авторами разработано четыре метода построения систем прогнозирования временных параметров работы железнодорожного переезда: первый базируется на передаче данных в безопасную платформу аналитики с локомотивов посредством транспондеров, второй состоит в информационном сопряжении систем железнодорожной автоматики и телемеханики с интеллектуальными транспортными системами на автомобильных дорогах, третий связан с мониторингом параметров движения поезда посредством оптоволоконного кабеля и устройств расшифровки оптических сигналов, четвертый основан на использовании внешних рубежей контроля параметров движения поезда. Приведены описания каждого из методов, алгоритмы и примеры определения временных параметров работы устройств ограждения на переездах, а также их достоинства и недостатки. Представленные авторами решения целесообразно учитывать при разработке комплексных систем интеллектуального управления движением, в особенности, в крупных городах и мегаполисах.

## Информация об авторах:

**Ефанов Дмитрий Викторович**, д.т.н., профессор, действительный член Международной академии транспорта, член Института инженеров электротехники и электроники; профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург; профессор Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем (лаборатория № 5) Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург; профессор кафедры "Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте" Российского университета транспорта (МИИТ), г. Москва; профессор кафедры "Автоматика и телемеханика" Ташкентского государственного транспортного университета, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4563-6411>

**Елина Есения Игоревна**, аспирант Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4167-3591>

**Кашталинский Александр Сергеевич**, к.т.н., доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4997-5055>

## Для цитирования:

Ефанов Д. В., Елина Е. И., Кашталинский А. С. Интеграция систем прогнозирования временных параметров работы устройств ограждения на железнодорожных переездах с интеллектуальными транспортными системами на автомобильных дорогах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 31-41.

## For citation:

D. V. Efanov, Y. I. Yelina, A. S. Kashtalinskiy, "Integration of Systems for Forecasting the Temporal Parameters of the Operation of Protective Devices at Railway Crossings with Intelligent Transport Systems on City Roads," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 2, pp. 31-41. (in Russian)

## Введение

Железнодорожная и автодорожная транспортные системы разделены и «соприкасаются» преимущественно только в тех местах, где оказываются пересечения автомобильных и железных дорог в одном уровне – железнодорожные переезды [1]. Поскольку концепция обеспечения безопасности движения поездов подразумевает реализацию алгоритмов управления с четкой проверкой действий средствами автоматики, а обеспечение безопасности на автомобильных дорогах базируется на соблюдении водителями правил движения, автомобильная транспортная система создает уязвимости в работе железнодорожной транспортной системы. И основным ненадежным компонентом взаимодействия двух систем является человек – водитель автотранспортного средства. Человеческий фактор является весомым в обеспечении свойства безопасности движения на железнодорожном переезде, как и в любой управляющей системе [2, 3].

Существует колоссальное количество исследований в этой связи, направленных на разработку технических решений, позволяющих заблаговременно зафиксировать нарушения на переездах со стороны автомобильного транспорта. Вот только некоторые из них [4-9]. Известны и работы, в которых модернизируются сами технические решения управляющих схем на железнодорожном транспорте [10, 11]. Но общим выходом из ситуации, конечно же, является строительство развязок автомобильных и железных дорог в разных уровнях. Это возможно не всегда, например, в районах с плотной городской застройкой или же в районах с низкой интенсивностью железнодорожного и автомобильного движения – по экономическим соображениям. На линиях высокоскоростного сообщения зачастую исключают использование переездов.

Итак, железнодорожный переезд – наиболее уязвимый компонент и железнодорожной, и автодорожной транспортных систем. Для обеспечения безопасности движения по нему используют различные технические средства ограждения движения со стороны автотранспорта (светофоры, автошлагбаумы, устройства заграждения пути, барьерные шлагбаумы) в зависимости от значимости (категории) переезда [12], а также технические средства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), обеспечивающие передачу данных на движущиеся поезда: к примеру, устройства кодирования рельсовых цепей и заградительные светофоры. При расчете временных параметров срабатывания устройств ограждения на переездах учитывают множество факторов [13]. По результатам расчетов определяются временные параметры для срабатывания устройств ограждения на переездах, а также точка начала извещения о закрытии переезда для движения автомобильного транспорта и точка открытия переезда.

Современные достижения в области компьютерных и интеллектуальных технологий позволяют говорить о возможности развития методов оптимизации на автомобильных дорогах. Они базируются на получении объективных и прогнозируемых данных от объектов транспортной инфраструктуры (в том числе, разнородных), построении цифровых двойников, реализации диагностических моделей на уровне безопасных платформ аналитики данных, тесной интеграции средств мониторинга технического состояния объектов транспортной инфраструктуры и подвижных единиц, а также параметров движения последних, с интеллектуальными системами

управления. Для развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на автомобильных дорогах, в особенности, в крупных городах и мегаполисах, весьма полезно было бы иметь информационное сопряжение с системами управления движением поездов. В настоящее время этого нет: как навигационные системы, так и ИТС на автомобильных дорогах не имеют ни действительных, ни прогнозируемых данных о работе объектов железнодорожного комплекса и воспринимают информацию по факту ее появления, например, по мере фиксации устройством извещения наличия поезда на подходе к переезду и включения средств ограждения для движения автомобильного транспорта. Прогнозировать в аппаратно-программных средствах ИТС данные события оказывается невозможно. Однако информационное сопряжение систем управления на железнодорожном транспорте с ИТС дало бы положительный эффект для всех видов транспорта и участников движения, поскольку обеспечило бы возможность повышения безопасности движения поездов и возможность оптимизации параметров движения автотранспортных средств.

В настоящей статье авторы приводят методы построения систем прогнозирования временных параметров работы железнодорожного переезда с информационным сопряжением с ИТС на автомобильных дорогах.

### 1 Передача данных с локомотива посредством транспондера

Технически можно использовать несколько методов для получения данных о движении поезда по железнодорожной линии для того, чтобы определить прогнозируемые времена срабатывания устройств ограждения – закрытия и открытия переезда.

Наиболее удачным, но технически самым сложным, является оснащение каждой тяговой единицы железнодорожного транспорта транспондерами, передающими данные о местоположении или напрямую скорости движения через определенные интервалы  $\tau$  времени, например, через каждые 10 с (рис. 1). Данные защищаются и передаются посредством спутниковой связи в безопасную платформу аналитики данных (БПАД), в которой имеются координаты железнодорожного переезда, точные данные о расстоянии, на котором срабатывают устройства передачи данных об извещении о закрытии переезда в системах ЖАТ (устройство  $\pi_1$  на схематичном отображении участка железнодорожного пути), точные данные о времени, за которое срабатывают устройства извещения о закрытии переезда и вычисления времени до закрытия (устройство  $\pi_2$ ), план и профиль пути.

Данные бортовых средств автоматизации управления движением локомотива в самом простом случае позволяют определять текущую скорость движения и координату по GPS/ГЛОНАСС. Это позволяет безопасной платформе аналитики данных с частотой дискретизации  $\tau$  выполнять процедуру вычисления прогнозируемого времени до закрытия переезда ( $t_p$ ), проследования к переезду ( $t_s$ ) и открытия переезда ( $t_o$ ) для движения автомобильного транспорта. Данные о временах  $t_p$ ,  $t_s$  и  $t_o$  передаются в ИТС на автомобильных дорогах в целях выбора режимов их функционирования с учетом дорожной обстановки и предстоящего закрытия переезда для движения автомобильного транспорта. Данные времен  $t_p$ ,  $t_s$  и  $t_o$  корректируются по мере обновления данных с заданным периодом  $\tau$  дискретизации.

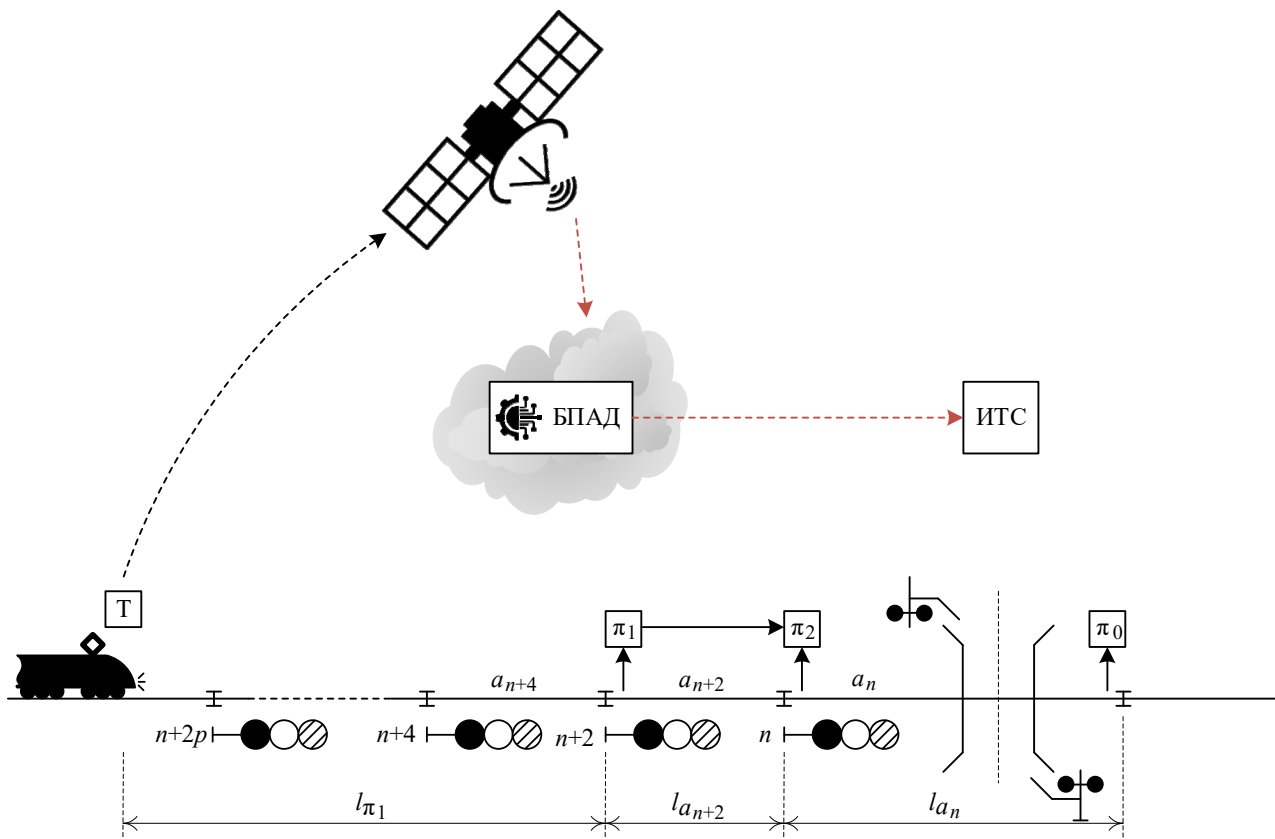


Рис. 1. Условная схема информационного сопряжения посредством транспондера, устанавливаемого в локомотиве

Из приведенного выше описания следует, что существует три основные отсечки времени, от которых можно изменить работу контроллеров светофоров в ИТС:

1. За время  $t_p$  осуществляется передача данных об изменении режимов работы светофоров на близлежащих перекрестках, движение через которые осуществляется к переезду. Это позволит оптимизировать движение транспортных средств на автомобильных дорогах с учетом предстоящего закрытия переезда для движения автотранспорта.

2. В момент времени  $t_s$  переезд закрывается для движения автомобильного транспорта. Время его закрытия определяется величиной  $(t_o - t_s)$ , где  $t_s$  и  $t_o$  – это также не фактические времена, а прогнозируемые.

3. В момент времени  $t_o$  переезд открывается для движения автомобильного транспорта.

Фактически времена  $t_p$ ,  $t_s$  и  $t_o$  определяются, исходя из зафиксированной скорости движения поезда на участке железнодорожной линии, расстояний до устройств срабатывания переездной сигнализации, а также длины поезда, определяемой его составом  $l_p$ . Расстояние  $l_{a_n}$  – это расстояние между устройствами контроля освобождения переезда (устройства  $\pi_0$ ) и устройствами включения устройств ограждения на переездах (устройства  $\pi_2$ ). Время проследования данного расстояния определяется по формуле:

$$t_o = \frac{l_{a_n}}{v_{a_n}}, \quad (1)$$

где  $v_{a_n}$  – скорость движения поезда на участке  $a_n$ .

Формула (1) предполагает равномерность движения поезда, что является некоторым частным случаем равенства  $a = 0$  ( $\text{м/с}^2$ ) ускорения движения поезда. В реальности может присутствовать отрицательное или положительное ускорение. С транспондера будет с периодом времени  $\tau$  приходить обновленное показание скорости (сюда для простоты описания включим время передачи и обработки данных о скорости в безопасной платформе аналитики данных). Поэтому ускорение учитывать не будем. Тогда время  $t_o$  будет определяться с учетом коррекции оставшегося расстояния каждые  $\tau$  с.

**Алгоритм 1.** *Определение прогнозируемого времени открытия переезда:*

1. Фиксируем оставшееся расстояние до открытия переезда  $l'_{a_n} = l_0$  и скорость движения поезда в этот момент времени  $v_{(a_n)_0}$  в момент проследования точки включения устройств ограждения на переезде.

2. Устанавливаем  $i=1$ .

3. Определяем оставшееся расстояние  $l'_{(a_n)_i} = l_0 + l_p - \tau v_{(a_n)_i}$ .

4. Проверяем условие  $l'_{(a_n)_i} > 0$ . Если «да», то переходим к следующему пункту. Если «нет», переходим к п. 14.

5. Определяем прогнозируемое время до открытия переезда на шаге  $i$ :  $t_{(o)_i} = \frac{l'_{(a_n)_i}}{v_{(a_n)_i}}$ .

6. Отдаем значение  $t_{(o)_i}$  в ИТС на автомобильном транспорте.

7. Полагаем  $i=i+1$ .

8. Фиксируем значение скорости  $v_{(a_n)_i}$  через  $\tau$  с.

9. Определяем оставшееся расстояние до открытия переезда:  $l'_{(a_n)_i} = l'_{(a_n)_{i-1}} - \tau v_{(a_n)_i}$ .

10. Проверяем условие  $l'_{(a_n)_i} > 0$ . Если «да», то переходим к следующему пункту. Если «нет», переходим к п. 14.

11. Определяем прогнозируемое время до открытия переезда на шаге  $i$ :  $t_{(o)_i} = \frac{l'_{(a_n)_i}}{v_{(a_n)_i}}$ .

12. Отдаем значение  $t_{(o)_i}$  в ИТС на автомобильном транспорте.

13. Переходим к п. 7.

14. Сбрасываем оставшееся время до нуля.

Приведем здесь пример использования алгоритма 1 для прогнозирования времени открытия переезда.

**Пример 1.** Информационное сопряжение выполнено по условной схеме, приведенной на рис. 1. Определить прогнозируемое время открытия переезда с требуемым шагом дискретизации.

**Шаг 1.** Зафиксируем исходные данные:

- период дискретизации  $\tau = 10$  (с);
- оставшееся расстояние до открытия переезда  $l_0 = 800$  (м);
- длина поезда, определяемая составом поезда  $l_p = 400$  (м);
- текущая скорость поезда  $v_{(a_n)_0} = 20$  (м/с).

**Шаг 2.** Устанавливаем шаг итерации  $i=1$ .

**Шаг 3.** Определяем оставшееся расстояние:

$$l'_{(a_n)_1} = l_0 + l_p - \tau v_{(a_n)_1} = 800 + 400 - 10 \cdot 20 = 1000 \text{ (м)}.$$

**Шаг 4.** Условие  $l'_{(a_n)_1} > 0$  выполняется. Так как  $1000 > 0$  продолжаем вычисления.

**Шаг 5.** Рассчитываем прогнозируемое время до открытия переезда:  $t_{(o)_1} = \frac{l'_{(a_n)_1}}{v_{(a_n)_1}} = \frac{1000}{20} = 50$  (с).

**Шаг 6.** Отдаем значение  $t_{(o)_1} = 50$  (с) в ИТС на автомобильном транспорте.

**Шаг 7.** Устанавливаем  $i = i+1=2$ .

**Шаг 8.** Фиксируем значение скорости. Через  $\tau=10$  (с) скорость поезда не изменилась  $v_{(a_n)_1} = v_{(a_n)_2} = 20$  (м/с).

**Шаг 9.** Производим пересчет оставшегося расстояния. Новое расстояние до переезда:  $l'_{(a_n)_2} = l'_{(a_n)_1} - \tau v_{(a_n)_2} = 1000 - 10 \cdot 20 = 800$  (м).

**Шаг 10.** Условие  $l'_{(a_n)_2} > 0$  выполняется, так как  $800 > 0$ . Продолжаем вычисления.

**Шаг 11.** Определяем прогнозируемое время до открытия переезда:  $t_{(o)_2} = \frac{l'_{(a_n)_2}}{v_{(a_n)_2}} = \frac{800}{20} = 40$  (с).

**Шаг 12.** Отдаем значение  $t_{(o)_2} = 40$  (с) в ИТС на автомобильном транспорте.

**Шаг 13.** Переходим к следующей итерации  $i = 3$ . Итерационный процесс продолжается, пока  $l'_{(a_n)_i}$  не достигнет нуля.

Расчетные данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Прогнозирование времени открытия переезда

Шаг итерации	$v_{(a_n)_i}$ – текущая скорость, м/с	$l'_{(a_n)_i}$ – оставшееся расстояние, м	$t_{(o)_i}$ – прогнозируемое время до открытия, с
1	20	1000	50
2	20	800	40
3	23	570	24,7
4	23	340	14,7
5	25	90	3,6
6	25	0	0

Аналогично определяется прогнозируемое время до закрытия переезда за какое-то объективное время до наступления этого события, например, за время  $t_{\max}$ . Для этого можно следовать такому алгоритму.

**Алгоритм 2.** Определение прогнозируемого времени закрытия переезда:

1. Уточняем расстояние до точки срабатывания устройств включения ограждения переезда, которое поезд пройдет с максимально установленной скоростью  $v_{\max}$  за время  $t_{\max}$ :  $l_{\max} = t_{\max} v_{\max}$ . В момент прохождения расстояния  $l_{\max}$  начинаем выполнять проверку оставшегося времени до включения устройств ограждения.

2. Полагаем  $i=0$ .

3. Фиксируем расстояние до точки включения устройств ограждения на переезде  $l_{\pi_2} = l_{\max} = l_{a_{n+2}} + l_{\pi_1}$  и скорость движения поезда в этот момент времени  $v_{(\pi_2)_i}$ .

4. Вычисляем оставшееся расстояние  $l_{(\pi_2)_i} = l_{\pi_2} - \tau v_{(\pi_2)_i}$ .

5. Проверяем оставшееся время до включения устройств ограждения при движении с действующей скоростью  $t_{(p)_i} = \frac{l_{(\pi_2)_i}}{v_{(\pi_2)_i}}$ , проходимое за время  $\tau$ .

6. Если  $t_{(p)_i} > t_{\max}$ , переходим к следующему пункту; иначе – к пункту 17.

7. Вводим предполагаемые значение расстояния  $l'_{(\pi_2)_i}$  и времени  $t'_{(p)_i}$ , которое пройдет поезд при сохранении текущей скорости. Вычисляем предполагаемое расстояние  $l'_{(\pi_2)_{i+1}} = l_{(\pi_2)_i} - \tau v_{(\pi_2)_i}$ .

8. Проверяем предполагаемое время до включения устройств ограждения при движении с действующей скоростью  $t'_{(p)_{i+1}} = \frac{l'_{(\pi_2)_{i+1}}}{v_{(\pi_2)_i}}$ , проходимое за время  $\tau$ .

9. Если  $t'_{(p)_{i+1}} > t_{\max}$ , переходим к следующему пункту; иначе – к пункту 16.

10. Полагаем  $i=i+1$ .

11. Фиксируем новую скорость поезда  $v_{(\pi_2)_i}$  через  $\tau = 10$  с.

12. Вычисляем оставшееся расстояние  $l_{(\pi_2)_i} = l_{(\pi_2)_{i-1}} - \tau v_{(\pi_2)_i}$ .

13. Вычисляем предполагаемое расстояние  $l'_{(\pi_2)_{i+1}} = l_{(\pi_2)_i} - \tau v_{(\pi_2)_i}$ .

14. Проверяем предполагаемое время до включения устройств ограждения при движении с действующей скоростью  $t'_{(p)_{i+1}} = \frac{l'_{(\pi_2)_{i+1}}}{v_{(\pi_2)_i}}$ , проходимое за время  $\tau$ .

15. Если  $t'_{(p)_{i+1}} > t_{\max}$ , переходим к п. 10; иначе – к пункту 16.

16. Принимаем  $t'_{(p)_{i+1}} = t_{(p)_i}$ .

17. Отдаем значение  $t_{(p)_i} \leq t_{\max}$  в ИТС на автомобильном транспорте.

18. Сбрасываем оставшееся время до нуля.

Приведем пример работы алгоритма 2.

**Пример 2.** Информационное сопряжение выполнено по условной схеме, приведенной на рис. 1. Определить прогнозируемое время закрытия переезда с требуемым шагом дискретизации.

**Шаг 1.** При входе поезда в зону мониторинга зафиксируем исходные данные:

- период дискретизации  $\tau = 10$  (с);
- максимальная скорость поезда  $v_{\max} = 30$  (м/с);
- текущая скорость поезда  $v_{(\pi_2)_0} = 22$  (м/с);
- прогнозируемое время до закрытия переезда  $t_{\max} = 80$  (с).

Уточняем расстояние  $l_{\max}$ :  $l_{\max} = t_{\max} v_{\max} = 80 \cdot 30 = 2400$  (м).

**Шаг 2.** Устанавливаем шаг итерации  $i=0$ .

**Шаг 3.** Фиксируем расстояние до точки включения устройств ограждения:  $l_{\pi_2} = l_{\max} = l_{a_{n+2}} + l_{\pi_1} = 2400$  (м);

Фиксируем скорость движения поезда в этот момент:  $v_{(\pi_2)_0} = 19$  (м/с).

**Шаг 4.** Найдем оставшееся расстояние:  $l_{(\pi_2)_0} = l_{\pi_2} - \tau v_{(\pi_2)_0} = 2400 - 10 \cdot 19 = 2210$  (м).

**Шаг 5.** Рассчитаем время до закрытия переезда:  $t_{(p)_0} = \frac{l_{(\pi_2)_0}}{v_{(\pi_2)_0}} = \frac{2210}{19} \approx 116,3$  (с).

**Шаг 6.** Условие  $t_{(p)_0} > t_{\max}$  выполняется. Так как  $116,3 > 80$  продолжаем вычисления.

**Шаг 7.** Найдем предполагаемое расстояние:  $l'_{(\pi_2)_1} = l_{(\pi_2)_0} - \tau v_{(\pi_2)_0} = 2210 - 10 \cdot 19 = 2020$  (м).

**Шаг 8.** Вычислим предполагаемое время до включения устройств ограждения:  $t'_{(p)_1} = \frac{l'_{(\pi_2)_1}}{v_{(\pi_2)_0}} = \frac{2020}{19} \approx 106,3$  (с).

**Шаг 9.** Условие  $t'_{(p)_1} > t_{\max}$  выполняется. Так как  $106,3 > 80$  продолжаем вычисления.

**Шаг 10.** Устанавливаем  $i = i+1=1$ .

**Шаг 11.** Новая скорость поезда  $v_{(\pi_2)_1} = 18$  (м/с).

**Шаг 12.** Найдем оставшееся расстояние:  $l_{(\pi_2)_1} = l_{(\pi_2)_0} - \tau v_{(\pi_2)_1} = 2210 - 10 \cdot 18 = 2030$  (м).

**Шаг 13.** Вычислим предполагаемое расстояние:  $l'_{(\pi_2)_2} = l_{(\pi_2)_1} - \tau v_{(\pi_2)_1} = 2030 - 10 \cdot 18 = 1850$  (м).

**Шаг 14.** Определяем предполагаемое время до включения устройств ограждения:

$$t'_{(p)_2} = \frac{l'_{(\pi_2)_2}}{v_{(\pi_2)_1}} = \frac{1850}{18} = 102,7 \text{ (с)}.$$

**Шаг 15.** Условие  $t'_{(p)_2} > t_{\max}$  выполняется. Так как  $102,7 > 80$  продолжаем вычисления.

**Шаг 16.** Переходим к следующей итерации  $i = 2$ . Итерационный процесс продолжается, пока  $t'_{(p)_{i+1}} < t_{\max}$ , чтобы передать показания в ИТС на автомобильном транспорте.

В таблицу 2 сведены данные расчета для примера.

Недостатком метода является необходимость оборудования всех локомотивов транспондерами. Эта задача, однако, решается путем принудительного оснащения бортовых средств транспондерами с возможностью передачи данных о движении на безопасные платформы интеграции данных для использования их в смежных транспортных системах.

Также недостатком является то, что прогнозируемые времена передаются не непрерывными метками, а корректируемыми через дискретные промежутки времени метками данных.

Прогнозирование времени закрытия переезда

Шаг итерации	$v_{(a_n)}$ – текущая скорость, м/с	$l_{(\pi_2)_i}$ – оставшееся расстояние, м	$l'_{(\pi_2)_{i+1}}$ – предполагаемое оставшееся расстояние, м	$t'_{(p)_{i+1}}$ – предполагаемое прогнозируемое время до закрытия переезда, с
0	19	2210	2020	106,3
1	18	2030	1850	102,7
2	18	1850	1670	92,7
3	18	1670	1490	82,7
4	17	1500	1330	78,2

### 2 Интеграция через системы железнодорожной автоматики и телемеханики

Следующий метод получения данных в современных условиях функционирования эксплуатирующей организации ОАО «РЖД» представляется более реальным, однако тоже не лишен недостатков, связанных с прерывистостью передачи прогнозируемого времени в дискретные промежутки. Метод реализуется путем информационного сопряжения с устройствами диспетчерской централизации и диспетчерского контроля устройств ЖАТ [14-16]. Схема информационного сопряжения приведена на рисунке 2.

Начало отсчета времени в представленном варианте зафиксировать проще с учетом возможной привязки к имеющимся блок-участкам и длинам рельсовых цепей. Если рассматривается современная автоматическая блокировка с тональными рельсовыми цепями и централизованным размещением оборудования, то на расстоянии  $l_{\max} = t_{\max} v_{\max}$ , где величина  $t_{\max}$  задается заранее можно зафиксировать движение

поезда. Тогда величина  $l_{\max}$  включает в себя определенное количество рельсовых цепей:  $l_{\max} = \sum_{i=1}^q l_{R_i}$ ,  $l_{R_i}$  – длина  $i$ -ой рельсовой цепи.

Используя данные системы диспетчерской централизации, можно фиксировать времена последовательного занятия рельсовых цепей и высчитывать действительную скорость поезда:

$$v_i = \frac{l_i}{(t_{i+1} - \tau) - (t_i - \tau)}, \quad (2)$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -ой рельсовой цепи,  $t_i$  и  $t_{i+1}$  – зафиксированные времена занятия  $i$ -ой и  $(i+1)$ -ой рельсовых цепей,  $\tau$  – задержка в срабатывании устройств и передачи данных в систему прогнозирования (реле в системе автоблокировки срабатывает с выдержкой времени 6 с, а допустимое время задержки передачи сигналов в системах железнодорожной автоматики достигает 4 с).

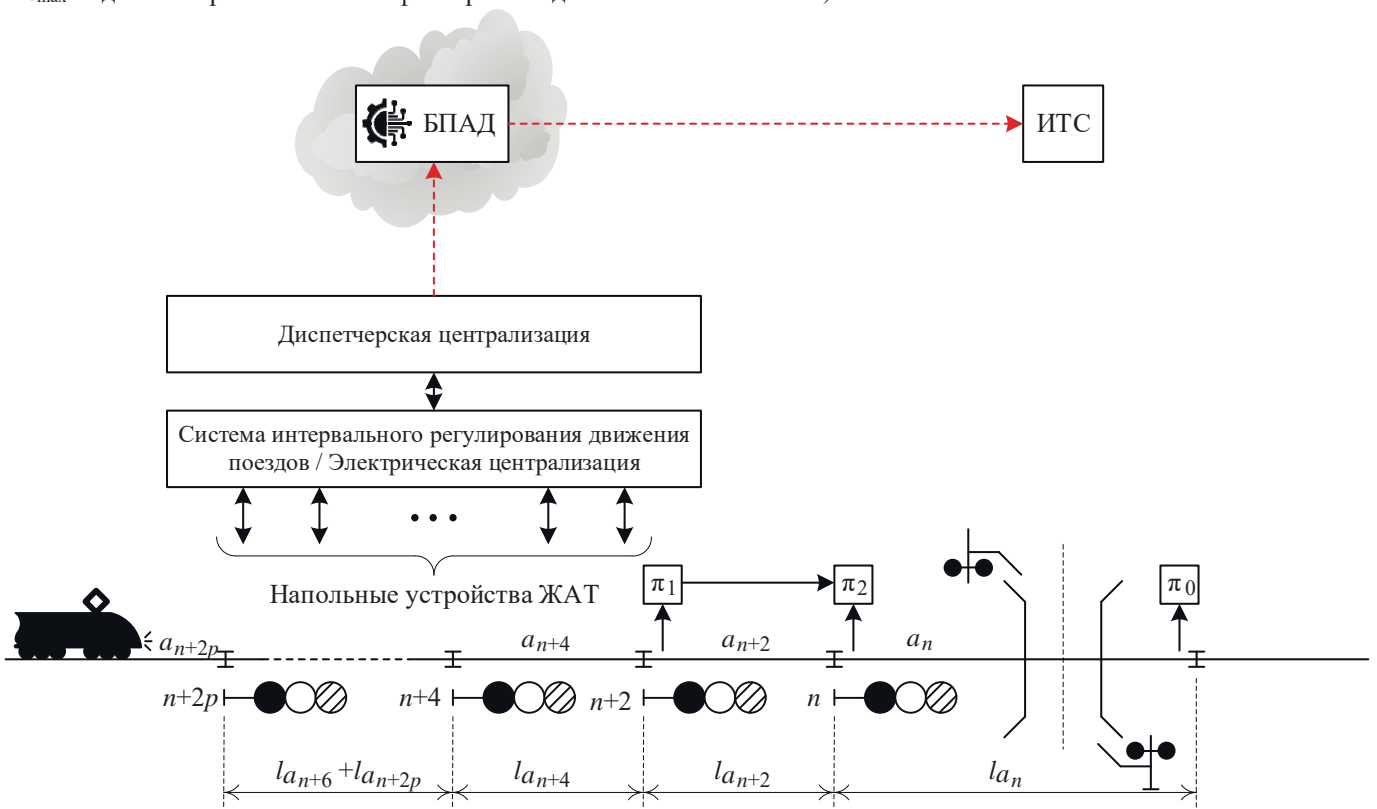


Рис. 2. Условная схема информационного сопряжения через устройства диспетчерской централизации и диспетчерского контроля

Иными словами, данные о скорости будут отставать минимум на 10 с. Это можно учесть при вычислении прогнозируемых времен работы устройств ограждения: требуется учитывать такую составляющую ( $-\tau_i$ ) в пройденном расстоянии всякий раз после вычисления прогнозируемого времени срабатывания устройств ограждения при занятии  $i+1$  рельсовой цепи.

Данные о скорости движения поезда будут обновляться каждый раз, когда он занимает новую рельсовую цепь.

Приведем пример использования данного метода в прогнозировании временных параметров срабатывания устройств ограждения.

**Пример 3.** Информационное сопряжение выполнено при условной схеме, приведенной на рис. 2. Также известны следующие исходные данные:

- длина рельсовой цепи:  $l_1 = 2000$  (м);
- длина от конца последней  $i$ -ой рельсовой цепи до переезда:  $l_{пр} = 400$  (м);
- время задержки передачи сигнала:  $\tau = 10$  (с);
- $t_{max} = 60$  (с);
- время занятия рельсовой цепи:  $t_1 = 110$  (с).

**Решение.** Рассчитаем скорость поезда на участке:

$$v_1 = \frac{l_1}{(t_1 - \tau)} = \frac{2000}{(110 - 10)} = 20 \text{ (м/с);}$$

Спрогнозируем время прибытия на переезд:

$$t_{np} = \frac{l_{np}}{v_1} = 20 \text{ (с).}$$

Определим момент начала закрытия переезда:

$$l_{зак} = v_1(t_{max} + t_{np}) = 20(60 + 20) = 1600 \text{ (м).}$$

Зная, что переезд должен начать закрываться, когда поезд находится на расстоянии 1600 (м) от переезда, вычислим момент времени для начала закрытия переезда:

$$t_{зак} = \frac{l_{зак}}{v_1} = \frac{1600}{20} = 80 \text{ (с).}$$

Переезд должен закрыться, когда поезд находится на расстоянии 1600 (м) от него, что соответствует времени около 80 (с).

### 3 Использование системы мониторинга движения поезда на основе оптоволоконного кабеля

Следующий метод связан с использованием данных системы непрерывного мониторинга параметров движения поезда, реализованной на основе технологии DAS (Distributed Acoustic Sensor) [17, 18]. Такой вариант возможен как дооснащение действующего участка железной дороги системой мониторинга на основе оптоволоконного кабеля. Схема информационного сопряжения представлена на рис. 3.

Технология DAS позволяет фиксировать параметры скорости движения и координаты местоположения поезда с погрешностью до 100 м, чего достаточно для решения задачи прогнозирования. При этом точность можно повысить за счет дополнительных средств контроля. Программные средства DAS настраиваются таким образом, чтобы можно было зафиксировать наличие поезда на расстоянии  $l_{max} = t_{max} v_{max}$ , где величина  $t_{max}$  фиксируется заранее, исходя из условий работы автодорожных переездов. Фактически на этом расстоянии прогнозируемое время срабатывания устройств ограждения будет равно  $t_p \geq t_{max}$ . Прогноз времени можно передавать с заданной частотой дискретизации и назначать режимы работы автодорожных светофоров, исходя из плотности движения автотранспорта в заданное время суток и при текущих погодных условиях.

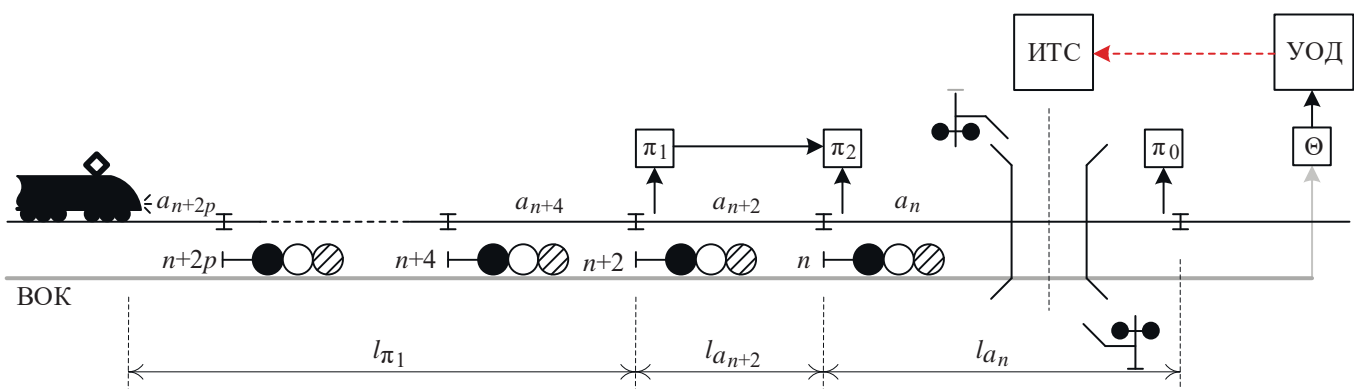
**Пример 4.** Информационное сопряжение выполнено при условной схеме, приведенной на рис. 3. Также известны следующие исходные данные:

- $v_{max} = 30$  (м/с);
- $v_i = 20$  (м/с) – текущая скорость поезда;
- $t_{max} = 80$  (с).

**Решение.** Вычислим расстояние, за которое система зафиксирует поезд:  $l_{max} = t_{max} v_{max} = 2400$  (м).

Найдем фактическое время прибытия:  $t_p = \frac{l_{max}}{v_i} = 120$  (с).

Условие  $t_p \geq t_{max}$  выполняется, так как  $120 \geq 80$ , значит прогнозируемое время срабатывания устройств найдено.



**Рис. 3.** Условная схема информационного сопряжения с системой внешнего мониторинга движения поезда с использованием оптоволоконного кабеля:  
УОД – устройство обработки данных; Θ – устройство расшифровки оптического сигнала

#### 4 Использование внешних рубежей контроля параметров движения поезда

Наименее информативный, но не требующий больших экономических вложений метод демонстрируется на рисунке 4. Он подразумевает установку двух рубежей (основного и дополнительного) для фиксации параметров движения приближающегося к переезду поезда. Данные рубежи оборудуются, исходя из требуемого расчетного времени до срабатывания устройства извещения о приближении с учетом максимальной допустимой скорости на участке. На этапе выбора зоны установки рубежей уточняется расстояние до точки срабатывания устройств включения ограждения переезда, которое поезд пройдет с максимальной установленной скоростью  $v_{\max}$  за время  $t_{\max}$ :  $l_{\max} = t_{\max} v_{\max}$ . Здесь устанавливается устройство А, позволяющее зафиксировать реальную скорость движения поезда и вычислить время  $t_{\pi_1} = \frac{l_{\max}}{v_{\pi_1}}$ , где  $v_{\pi_1}$  – скорость в мо-

мент прохода точки расположения устройства А. При этом устройство А может находиться всё время в спящем режиме до достижения поездом точки фиксации расстояния  $l_{\max} + \Delta l$  и включаться в этот момент, инициируя и пробуждение устройства В. Для этого требуется использование дополнительного датчика фиксации движущегося поезда, располагаемого на удалении от камеры на заранее выбранном расстоянии  $\Delta l$  и связанного беспроводным или проводным интерфейсом с ним. Реальное время до закрытия переезда  $t_{\pi_1}$  передается на контроллер управления светофором. Устройство В располагается на удалении от устройства А для уточнения параметров движения поезда на расстоянии  $l^* = t^* v_{\max}$ , где  $t^*$  также выбирается заранее.

Вообще, в качестве устройств А и В могут выступать не видеокamеры и не устройства контроля скорости, а датчики, фиксирующие проход поезда последовательно, функционирующие, например, по принципу работы счетчиков осей [19]. Поскольку система прогнозирования параметров работы переезда не относится к системам критического применения, здесь могут быть использованы и автономные датчики счета

осей [20]. По времени фиксации вступления поезда на первый и второй рубежи контроля можно вычислить реальную скорость и сформировать прогнозируемое время

$$v_{\pi_1} = \frac{l^*}{t_{\pi_1}}, \quad (3)$$

$$t_p = \frac{l_{a_{n+2}} + (l_{\max} - l^*)}{v_{\pi_1}}. \quad (4)$$

**Пример 5.** Информационное сопряжение выполнено при условной схеме, приведенной на рис. 4. Также известны следующие исходные данные:

- $v_{\max} = 30$  (м/с);
- $v_{\pi_1} = 20$  (м/с) – текущая скорость поезда;
- $t_{\max} = 120$  (с);
- $l^* = 900$  (м);
- $\Delta l = 150$  (м);
- $l_{a_{n+2}} = 400$  (м).

**Решение.** Вычисляем расстояние до точки срабатывания устройства А включения ограждения переезда, которое поезд пройдет с максимальной установленной скоростью и временем:  $l_{\max} = t_{\max} v_{\max} = 120 \cdot 30 = 3600$  (м).

С помощью устройства А фиксируем текущую скорость поезда и находим реальное время до закрытия переезда:

$$t_{\pi_1} = \frac{l_{\max}}{v_{\pi_1}} = \frac{3600}{20} = 180 \text{ (с)}.$$

Устройство А включается через время  $t_{(\Delta l)}$ :

$$t_{(\Delta l)} = \frac{\Delta l}{v_{\max}} = \frac{150}{30} = 5 \text{ (с)}.$$

Спрогнозируем время прибытия поезда к переезду:

$$t_p = \frac{l_{a_{n+2}} + (l_{\max} - l^*)}{v_{\pi_1}} = \frac{400 + (3600 - 900)}{20} = 155 \text{ (с)}.$$

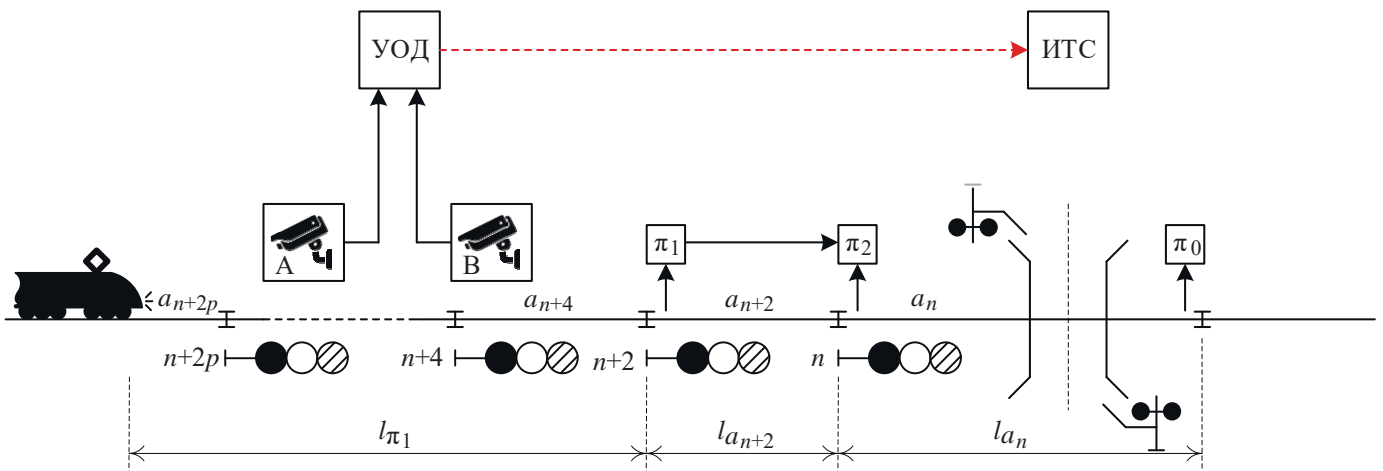


Рис. 4. Условная схема информационного сопряжения с использованием рубежей видеофиксации параметров движения

Все представленные здесь методы касаются однопутных участков железнодорожных линий. Однако с небольшой модификацией они могут успешно использоваться и для двухпутных участков железнодорожных линий – требуется вычислять минимум или максимум прогнозируемого времени движения поездов с четной и с нечетной сторон (в зависимости от того, какое событие, открытие или закрытие переезда, прогнозируется).

Итак, используем алгоритм 2 для каждого из направлений движения поездов (четного и нечетного). В этом случае действие алгоритма базируется на характеристиках движения обоих поездов.

**Алгоритм 3.** *Определение прогнозируемого времени закрытия переезда:*

1. Уточняем расстояния до точек срабатывания устройств включения ограждения переезда, которые поезда, движущиеся в нечетном и четном направлениях соответственно, пройдут с максимально установленной скоростью  $v_{1, \max}$  и  $v_{2, \max}$  за время  $t_{\max}$ :  $l_{1, \max} = t_{\max} v_{1, \max}$  и  $l_{2, \max} = t_{\max} v_{2, \max}$ .

2. Существует несколько случаев в движении поездов:

- поезд, следующий в нечетном направлении, достигает расстояния  $l_{1, \max}$  раньше, чем поезд, следующий в четном направлении, достигает расстояния  $l_{2, \max}$ ;
- поезд, следующий в нечетном направлении, достигает расстояния  $l_{1, \max}$  позже, чем поезд, следующий в четном направлении, достигает расстояния  $l_{2, \max}$ ;
- поезд, следующий в нечетном направлении, достигает расстояния  $l_{1, \max}$  одновременно с тем, как поезд, следующий в четном направлении, достигает расстояния  $l_{2, \max}$ .

Для инициации срабатывания устройств отсчета времени закрытия переезда можно использовать достижение любой из точек начала отсчета с последующей непрерывной коррекцией прогнозного времени. Устройство отсчета прогнозируемого времени до включения устройств ограждения на переезде включает за время  $t_{\max}$ , которое одинаково для обоих направлений движения поездов. Затем это время корректируется с учетом периода  $\tau$  получения данных с транспондеров обоих локомотивов о параметрах движения поездов.

Всякий раз вычисляются два времени:

$$t_{1, (p)_i} = \frac{l'_{1, \pi'_i}}{v_{1, (\pi'_i)_i}} \text{ и } t_{2, (p)_i} = \frac{l'_{2, \pi'_i}}{v_{2, (\pi'_i)_i}}.$$

Среди них выбирается наименьшее:

$$t_{j, (p)_i} = \min \{ t_{1, (p)_i}, t_{2, (p)_i} \}. \quad (5)$$

Именно оно и передается в ИТС на автомобильных дорогах с учетом шагов алгоритма 2.

Аналогично определяется время открытия переезда, но уже с учетом максимального значения времени проследования. Среди величин  $t_{1, (o)_i} = \frac{l'_{1, a_n}}{v_{1, (a_n)_i}}$  и  $t_{2, (o)_i} = \frac{l'_{2, a_n}}{v_{2, (a_n)_i}}$  выбираются максимальные значения:

$$t_{j, (o)_i} = \max \{ t_{1, (o)_i}, t_{2, (o)_i} \}. \quad (6)$$

Использование любого из представленных методов позволяет получить прогнозируемые времена срабатывания устройств ограждения на железнодорожных переездах. Это, в свою очередь, позволяет учитывать данные о прогнозируемых временах в работе интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах с целью оптимизации процессов управления.

#### 4 Выводы

Предложенные в настоящей работе методы прогнозирования данных о временных параметрах работы устройств ограждения на железнодорожных переездах позволяют получать ключевые данные об их работе. Зная эти параметры, можно дополнительно расширить функционал табло переменной информации, на которых выводятся и прогнозируемые времена и действующие, навигационных бортовых средств, а также ИТС на автомобильном транспорте.

Учет информации о работе железнодорожного переезда на практике позволит оптимизировать движение автотранспортных средств, а также косвенно повысить безопасность движения поездов за счет исключения нарушений, вызванных человеческим фактором со стороны водителей автотранспортных средств.

Наиболее простой с точки зрения влияния на инфраструктуру и подвижной состав железных дорог метод получения прогнозируемых данных – это прямая передача параметров с движущихся по железной дороге тяговых единиц (локомотивов). Однако это требует принудительного использования транспондеров на всех локомотивах.

Интересным вариантом является информационное сопряжение устройств и систем ЖАТ с ИТС. Однако этот вариант может быть отвергнут консервативным обществом железнодорожников. Одним из решений может оказаться интеграция с действующими на линиях железных дорог системами диспетчерского контроля устройств ЖАТ или системами их автоматизированного мониторинга [21, 22].

Вариант с контролем параметров движения поезда с помощью оптоволоконного кабеля также крайне интересен, поскольку не требует особенных капиталовложений и связан лишь с установкой устройства расшифровки данных, получаемых при движении поезда, а также сопряжения их с ИТС.

Вариант с установкой рубежей контроля параметров движения поезда возможен, но он дает менее точный прогноз. Устройства детектирования поезда могут располагаться на опорах контактной сети в недоступном для человека месте для исключения деструктивного влияния на оборудование. Могут использоваться счетчики осей для фиксации поезда.

Целесообразно учитывать предложения авторов при построении и реализации комплексных транспортных систем, в особенности, в городской транспортной экосистеме «умных» городов.

#### Литература

1. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020, 552 p.
2. Гавзов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. 1994. № 8. С. 3-50.

3. Сапожников В.В., Сапожников В.В., Христов Х.А., Гавзов Д.В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. Под ред. Вл.В. Сапожникова. М.: Транспорт, 1995, 272 с.

4. Хорошев В.В., Ефанов Д.В., Осадчий Г.В. Концепция полно-связного мониторинга инфраструктуры переездов // Транспорт Российской Федерации. 2018. №1. С. 47-52.

5. Ефанов Д.В. Цифровой железнодорожный переезд // Автоматика, связь, информатика. 2018. №11. С. 11-15.

6. Попов А.Н. Система для предотвращения столкновений на железнодорожном переезде при вынужденной остановке автотранспорта // Транспорт Урала. 2023. №1 (76). С. 75-81. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-75-81.

7. Anagnostopoulos A. Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis // Future Transportation. 2025. Vol. 5. Issue 1, pp. 1-17. DOI: 10.3390/future-transp5010024.

8. Трунаев А.М. Способы и средства повышения безопасности на железнодорожных переездах, перспективы их развития // Транспорт Российской Федерации. 2025. №4 (119). С. 33-37.

9. Dimitrova E., Dimitrov V., Dimitrova D. Analysis of Failures of Automatic Level Crossing Devices // Engineering Proceedings. 2025. Vol. 104. Issue 1, pp. 1-9. DOI: 10.3390/engproc2025104018.

10. Ефанов Д.В., Лыков А.А., Глух Е.А. Модернизация схемных решений переездной автоматики при организации высокоскоростного сообщения // Транспорт Урала. 2017. №1. С. 45-51. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-45-51.

11. Efanov D., Lykov A., Osadchy G. Testing of Relay-Contact Circuits of Railway Signalling and Interlocking // Proceedings of 15<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 242-248, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110095.

12. Сапожников В.В., Кокурин И.М., Кононов В.А., Лыков А.А., Никитин А.Б. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2006, 247 с.

13. Василенко М.Н., Тележенко Т.А., Валиев С.И. Автоматизация расчета параметров перегонной переездной сигнализации // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2010. № 3 (24). С. 54-62.

14. Ефанов Д.В., Плотников Д.Г., Осадчий Г.В. Сервис прогнозирования временных параметров работы железнодорожного переезда // Транспорт Российской Федерации. 2018. №4. С. 31-36.

15. Efanov D., Plotnikov D., Osadchy G. Prognosis Service for Navigation Systems Regarding Time Parameters of Railroad Crossing // Proceedings of 16<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018, pp. 201-208, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524770.

16. Ефанов Д.В., Плотников Д.Г., Осадчий Г.В. Система прогнозирования состояния переезда для мобильных навигационных устройств // Автоматика, связь, информатика. 2018. №9. С. 15-19.

17. Бухарин М.А., Шишков К.В. Технологии виброакустического мониторинга для нужд железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2020. №4. С. 58-59.

18. Бухарин М.А., Прокопенко С.В., Гуртовой К.В., Скубченко С.А., Трещиков В.Н. Позиционирование подвижного состава с использованием нейронных сетей // Автоматика, связь, информатика. 2019. №9. С. 8-10.

19. Грошев В.А. Об определении мест установки счетчиков осей в горловинах станций // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. №2. С. 162-177. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-162-177.

20. Для «ФИНК ЭЛЕКТРИК» нет преград нигде: на рельсах, в воздухе и даже на воде. Евразия Вести, 2017, IX, электронный ресурс: <http://eav.ru/publ1.php?publ1=2017-09a11>, дата обращения 29.08.2025 г.

21. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016, 171 с.

22. Ефанов Д.В., Осадчий Г.В. Микропроцессорная система диспетчерского контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: изд. 3-е., стер. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2023, 180 с.

## INTEGRATION OF SYSTEMS FOR FORECASTING THE TEMPORAL PARAMETERS OF THE OPERATION OF PROTECTIVE DEVICES AT RAILWAY CROSSINGS WITH INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS ON CITY ROADS

**Dmitry V. Efanov**, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, [TrES-4b@yandex.ru](mailto:TrES-4b@yandex.ru)

**Yeseniya I. Yelina**, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,, [eseniya-elina@mail.ru](mailto:eseniya-elina@mail.ru)

**Alexander S. Kashtalinskiy**, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, [ask1188@mail.ru](mailto:ask1188@mail.ru)

### Abstract

It is proposed to implement information coupling of diagnostic and forecasting systems in railway transport with intelligent transport systems on highways. This will allow taking into account the current and forecast values of the response times of fencing devices at railway crossings to optimize traffic on highways. The authors have developed four methods for constructing systems for predicting the temporal parameters of railway crossing operation: the first is based on transmitting data to a secure analytics platform from locomotives via transponders, the second consists in information coupling of railway automation and remote control systems with intelligent transport systems on highways, the third is related to monitoring train movement parameters via fiber-optic cable and decryption devices optical signals, the fourth one is based on the use of external boundaries for controlling the parameters of driving. Descriptions of each of the methods, algorithms and examples of determining the time parameters of the fence devices at crossings, as well as their advantages and disadvantages, are given. It is advisable to take into account the solutions presented by the authors when developing integrated intelligent traffic control systems, especially in large cities and megacities.

**Keywords:** railway crossing; forecasting of temporal parameters of crossing operation; intelligent transport system; information interface of systems for forecasting time parameters of crossing operation and intelligent transport systems.

## References

- [1] G. Theeg and S. Vlasenko, *Railway Signalling & Interlocking*, 3rd ed. Leverkusen, Germany: PMC Media House GmbH, 2020, 552 p.
- [2] D. V. Gavzov, V. V. Sapozhnikov and V. V. Sapozhnikov, "Methods for providing safety in discrete systems," *Automation and Remote Control*, vol. 55, no. 8, pp. 1085-1122, 1994.
- [3] V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, Kh. A. Khristov and D. V. Gavzov, *Methods of constructing safe microelectronic systems of railway automation*, V. V. Sapozhnikov, Ed. Moscow: Transport, 1995, 272 p.
- [4] V. V. Khoroshev, D. V. Efanov and G. V. Osadchy, "The concept of fully connected monitoring of crossing infrastructure," *Transport of the Russian Federation*, no. 1, pp. 47-52, 2018.
- [5] D. V. Efanov, "Digital railway crossing," *Automation, Communications, Informatics*, no. 11, pp. 11-15, 2018.
- [6] A. N. Popov, "System for prevention from collisions at railway crossing at forced stop of motor transport," *Transport of the Urals*, no. 1(76), pp. 75-81, 2023, doi: 10.20291/1815-9400-2023-1-75-81.
- [7] A. Anagnostopoulos, "Assessing safety and infrastructure design at railway level crossings through microsimulation analysis," *Future Transportation*, vol. 5, no. 1, pp. 1-17, 2025, doi: 10.3390/futuretransp5010024.
- [8] A. M. Trunaev, "Methods and means of improving safety at railway level crossings and their development prospects," *Transport of the Russian Federation*, no. 4, pp. 33-37, 2025.
- [9] E. Dimitrova, V. Dimitrov and D. Dimitrova, "Analysis of failures of automatic level crossing devices," *Engineering Proceedings*, vol. 104, no. 1, pp. 1-9, 2025, doi: 10.3390/engproc2025104018.
- [10] D. V. Efanov, A. A. Lykov and E. A. Gluh, "Modernization of scheme solutions for moving automation in the organization of high-speed communication," *Transport of the Urals*, no. 1, pp. 45-51, 2017, doi: 10.20291/1815-9400-2017-1-45-51.
- [11] D. Efanov, A. Lykov and G. Osadchy, "Testing of relay-contact circuits of railway signalling and interlocking," in *Proc. 15th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDT'S'2017)*, Novi Sad, Serbia, Sep. 29-Oct. 2, 2017, pp. 242-248, doi: 10.1109/EWDT'S.2017.8110095.
- [12] V. V. Sapozhnikov, I. M. Kokurin, V. A. Kononov, A. A. Lykov and A. B. Nikitin, *Operational fundamentals of automation and telemechanics*. Moscow: Educational and Methodological Center for Railway Transport, 2006.
- [13] M. N. Vasilenko, T. A. Telezhenko and S. I. Valiev, "Automation of calculating parameters of intermediate crossing signalling," *Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Communications*, no. 3, pp. 54-62, 2010.
- [14] D. V. Efanov, D. G. Plotnikov and G. V. Osadchy, "Service of forecasting time parameters of railway crossing operation," *Transport of the Russian Federation*, no. 4, pp. 31-36, 2018.
- [15] D. Efanov, D. Plotnikov and G. Osadchy, "Prognosis service for navigation systems regarding time parameters of railroad crossing," in *Proc. 16th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDT'S'2018)*, Kazan, Russia, Sep. 14-17, 2018, pp. 201-208, doi: 10.1109/EWDT'S.2018.8524770.
- [16] D. V. Efanov, D. G. Plotnikov and G. V. Osadchy, "A moving condition forecasting system for mobile navigation devices," *Automation, Communications, Informatics*, no. 9, pp. 15-19, 2018.
- [17] M. A. Bukharin and K. V. Shishkov, "Vibroacoustic monitoring technologies for railway transport needs," *Railway Transport*, no. 4, pp. 58-59, 2020.
- [18] M. A. Bukharin, S. V. Prokopenko, K. V. Gurtovoy, S. A. Skubchenko and V. N. Treshchikov, "Positioning of rolling stock using neural networks," *Automation, Communications, Computer Science*, no. 9, pp. 8-10, 2019.
- [19] V. A. Groshev, "On location of axle counters at stations," *Transport Automation Research*, vol. 8, no. 2, pp. 162-177, 2022, doi: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-162-177.
- [20] For FINK ELECTRIC, there are no barriers anywhere: on rails, in the air, or even on water, *Eurasia News*, IX, 2017. [Online]. Available: <http://eav.ru/publ.php?publId=2017-09a11>. [Accessed: Aug. 29, 2025].
- [21] D. V. Efanov, *Functional control and monitoring of railway automation and remote control devices*. St. Petersburg: PSTU, 2016.
- [22] D. V. Efanov and G. V. Osadchy, *Microprocessor-based dispatching control system for railway automation and telemechanics devices*, 3rd ed. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2023.

## Information about authors:

**Dmitry V. Efanov**, D. Sc. (Engineering), Professor, Full-member of the International Transport Academy, IEEE member; Professor of Transport Higher School of Machinery, Material and Transport Institute in Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg; Professor of Higher School of Cyber-physical Systems & Control of Institute of Cybersecurity and Computer Science in Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg; Leading researcher at the Laboratory of Problems of Organization of Transport Systems (Laboratory No. 5) of the Institute of Transport Problems named after N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg; Professor of "Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport" department, Russian University of Transport, Moscow; Professor of "Automation and Remote Control" department, Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4563-6411>

**Yeseniya I. Yelina**, Ph. D. student of Transport Higher School of Machinery, Material and Transport Institute in Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4167-3591>

**Alexander S. Kashtalinskiy**, Ph. D., Lecturer of Transport Higher School of Machinery, Material and Transport Institute in Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4997-5055>

# СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИТС НА БАЗЕ V2X

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-42-54

**Плотников Павел Владимирович,**

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, Россия, [plotnikov.pv@sut.ru](mailto:plotnikov.pv@sut.ru)

**Тамбовцев Глеб Ильич,**

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, Россия, [tambovcev.gi@sut.ru](mailto:tambovcev.gi@sut.ru)

**Владыко Андрей Геннадьевич,**

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, Россия, [vladyko@sut.ru](mailto:vladyko@sut.ru)

Manuscript received 05 December 2025;

Accepted 10 February 2026

Исследование выполнено за счет гранта Российского  
научного фонда № 24-29-00304, [https://rscf.ru/proj-  
ect/24-29-00304/](https://rscf.ru/project/24-29-00304/)

**Ключевые слова:** ИТС, граничные и туманные  
вычисления, V2X система, имитационное  
моделирование, simV2X

В статье рассматривается система имитационного моделирования интеллектуальных транспортных систем, основанная на технологии связи Vehicle-to-Everything. Цель разработки заключалась в создании инструмента анализа процессов взаимодействия между транспортными средствами и элементами дорожной инфраструктуры с учётом особенностей городской среды. Разработанный программный комплекс simV2X позволяет воспроизводить сценарии обмена данными, моделирования движения транспортных средств и получения оценки влияния зашумленности связи на эффективность взаимодействия элементов рассматриваемой динамической среды. Архитектура системы построена по модульному принципу, что обеспечивает гибкость при подборе параметров, расширении функциональности и адаптации к различным задачам. В работе приведён пример сценария, в котором мобильный узел инфраструктуры выполняет функции ретранслятора сообщений между транспортным средством и стационарным устройством передачи данных. Результаты эксперимента позволили показать различия в качестве связи при прямом и опосредованном обмене сообщениями, а также выявить влияние пространственного расположения и динамики объектов на устойчивость соединения. Полученные данные могут быть использованы для оценки эффективности распределённых архитектур в интеллектуальных транспортных системах, оптимизации размещения элементов инфраструктуры и планирования последующих экспериментальных исследований в области интеллектуальных транспортных систем.

## Информация об авторах:

**Плотников Павел Владимирович,** Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, заведующий кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доцент, Санкт-Петербург, Россия, ORCID 0000-0001-8869-6142

**Тамбовцев Глеб Ильич,** Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, аспирант, инженер студенческого конструкторского бюро, Санкт-Петербург, Россия, ORCID 0009-0006-8034-0516

**Владыко Андрей Геннадьевич,** Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, декан факультета радиоэлектронных систем и робототехники, к.т.н., доцент, Санкт-Петербург, Россия, ORCID 0000-0002-8852-5607

## Для цитирования:

Плотников П.В., Тамбовцев Г.И., Владыко А.Г. Система имитационного моделирования ИТС на базе V2X // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 42-54.

## For citation:

P. V. Plotnikov, G. I. Tambovtsev, A. G. Vladyko, "V2X-based ITS simulation system," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 2, pp. 42-54. (in Russian)

## Введение

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) стали важным элементом организации современной городской инфраструктуры. Основными задачами исследования в области ИТС являются повышение безопасности дорожного движения, рост эффективности управления дорожным движением и анализ устойчивости за счет интеграции коммуникационных, сенсорных и вычислительных технологий. В этом контексте связь между транспортными средствами и объектами инфраструктуры (Vehicle-to-Everything, V2X) играет важнейшую роль, обеспечивая обмен данными в реальном времени между транспортными средствами (Vehicle-to-Vehicle, V2V), инфраструктурой (Vehicle-to-Infrastructure, V2I), пешеходами (Vehicle-to-Pedestrian, V2P) и сетями (Vehicle-to-Network, V2N) [1]. Основная цель создания V2X решений состоит в возможности предоставлять транспортным средствам информацию о ситуации на дороге, организовывать платформу для совместного принятия решений. V2X можно считать основой совместной, подключенной и автоматизированной мобильности (CCAM). При этом растущая сложность и масштабируемость ИТС требует не только создания надежной беспроводной связи, но и организации распределенных вычислительных архитектур, способных обрабатывать массивные потоки данных с низкой задержкой и высоким уровнем отказоустойчивости [2].

Граничные вычисления (Edge Computing, EC) стали ключевым технологическим фактором для ИТС нового поколения, устраняющим ограничения облачно-ориентированных архитектур. В традиционных облачных решениях данные транспортного средства передаются для обработки в удаленные центры обработки данных, что создает неприемлемую задержку для критически важных по времени приложений, например систем безопасности, отвечающих за предотвращение столкновений, организация следования в группе и динамическая перестройка маршрута в реальном времени [3]. Использование граничных вычислителей позволяет устранить эти недостатки, развертывая вычислительные мощности и ресурсы хранения ближе к источникам данных, в дорожных узлах (Roadside Unit, RSU), базовых станциях (Base Station, BS) или даже внутри самих транспортных средств (Onboard Unit, OBU). Эта парадигма позволяет принимать решения менее чем за миллисекунды, поддерживая контекстно-зависимый анализ и снижая нагрузку на транзитную сеть [4].

В системе V2X граничные вычислительные узлы (Edge Nodes, EN) выполняют роль локальных центров принятия решений, которые объединяют данные датчиков с нескольких транспортных средств и элементов инфраструктуры. Осуществляя первичную структуризацию полученных данных и управление, эти узлы обеспечивают координацию в реальном времени между транспортными средствами, повышают надежность при нестабильном подключении, например, в городской среде, и облегчают масштабируемость в сценариях с интенсивным движением. Кроме того, на EN часто реализуются архитектуры на основе микросервисов, что позволяет проводить гибкую реконфигурацию в соответствии с сетевой нагрузкой и динамикой трафика. В ряде исследований показано, что автомобильные сети с поддержкой граничных устройств могут снизить сквозную задержку до 60% и повысить надежность в средах с высокой мобильностью [5].

Дополнительно отметим, что в недавних исследованиях [6] было показано, что граничные вычисления на тестовых стендах V2X достигают более 95% пакетной доставки в смоделированных городских сценариях, хотя реальная производительность ожидаемо снижается до 85-90% из-за наличия помех при передаче данных. Использование EC повышает масштабируемость в зашумленной городской среде, где высокая плотность транспортных средств создает значительные объемы данных, и уменьшает ограничения полосы пропускания сигнала за счет высокой загрузки каналов связи.

При этом использование граничных вычислителей влечет за собой ряд проблем в средах с ограниченными ресурсами, что требует эффективных стратегий распределения ресурсов для поиска вычислительного баланса.

В связи с появлением обозначенной проблемы была предложена парадигма туманных вычислений (Fog Computing, FC), которая представляет собой промежуточный слой между граничными устройствами и облаком, предлагая распределенную вычислительную инфраструктуру. Узлы тумана (Fog Nodes, FN), обычно развертываемые на мобильных RSU (Mobile Roadside Unit, mRSU) или стационарных RSU, агрегируют и обрабатывают данные, собранные с нескольких граничных устройств, выполняя такие задачи, как оптимизация потоков трафика, оптимальное распределение нагрузки, передача и кэширование важной системной информации.

В то время как использование EC направлено на организацию локальной обработки, FC расширяет эту концепцию, вводя иерархическую и совместную структуру между EN и FN [7]. Многопоточная структура организации FC позволяет точно контролировать, где и когда обрабатываются данные, поддерживая как глобальные, так и локальные задачи [8].

Использование туманных вычислений позволяет устранить ряд ограничений граничных устройств. Например, проблема ограниченных вычислительных или энергетических ресурсов.

Исследователи в работе [9] описывают модель использования инструментов визуализации на основе тумана в тестовом стенде Smart Highway, цель которого мониторинг гибридных коммуникаций V2X, демонстрация их работы и проверка эффективности в режиме реального времени. Использование FC позволяет организовывать иерархию обработки данных, когда чувствительные ко времени задачи обрабатываются на границе, а анализ данных, например, с использованием машинного обучения для прогнозирования трафика, выполняется в узлах тумана. Такая схема организации работы повышает устойчивость системы и поддерживает гибридные протоколы V2X.

Приведем краткий сравнительный анализ рассмотренных парадигм в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ

Характеристика	Облачные вычисления (Cloud)	Туманные вычисления (Fog)	Периферийные вычисления (Edge)
Местоположение	Централизованное облако	Распределённые узлы ближе к устройствам	Прямо на устройстве или шлюзе
Задержка	Высокая	Низкая	Очень низкая
Управление	Централизованное	Туманные вычисления (Fog)	Локальное

В таблице 2 приведены основные преимущества и недостатки использования FOG в сравнении с ЕС.

Таблица 2

Преимущества и недостатки использования FOG и ЕС

<i>Критерий</i>	<i>Fog Computing</i>	<i>Edge Computing</i>
Преимущества		
Масштабируемость	Более масштабируемая архитектура с промежуточными уровнями между устройствами и облаком	Ограничена ресурсами отдельных устройств
Централизованное управление	Лучше подходит для централизованного администрирования и координации между несколькими edge-узлами	Обычно локальное управление, труднее централизовать
Распределённая обработка	Может перераспределять нагрузку между несколькими fog-узлами	Обработка строго локальна – меньше гибкости
Поддержка более сложных сервисов	Подходит для приложений с высокой вычислительной сложностью (например, предиктивная аналитика)	Ограничена ресурсами устройства (CPU, память)
Улучшенная безопасность (при правильной реализации)	Предварительная фильтрация и защита перед отправкой в облако	Только локальная защита, ограниченные функции безопасности
Недостатки		
Сложность инфраструктуры	Более сложная архитектура, требующая развёртывания промежуточных узлов	Простая реализация – достаточно edge-устройства
Задержка	Из-за дополнительного промежуточного уровня может быть чуть больше задержка по сравнению с ЕС	Минимально возможная задержка – данные обрабатываются «на месте»
Затраты на внедрение и обслуживание	Требует выделенных fog-серверов, специального программного обеспечения и администрирования	Менее затратное решение – особенно для малых систем
Энергопотребление	Дополнительные узлы увеличивают общее потребление энергии	Обычно энергосберегающий режим edge-устройств

Проведенное сравнение позволяет заключить, что использование FC позволяет обеспечить непрерывность процесса обмена ресурсами между EN, FN и облаком, обеспечивая гибкую модель управления системой в вопросах совместного развёртывания и организации взаимодействия между транспортными средствами и управления движением в городской сети. В системах V2X туманные узлы часто выполняют функции промежуточного уровня, такие как агрегация данных, предварительная обработка, анализ безопасности и распределение контента. Они также служат координаторами для разнородных сетей, обеспечивая бесшовное взаимодействие между ними [10]. Дополнительно отметим, что туманные вычисления повышают устойчивость и адаптивность ИТС, предоставляя локальные резервные мощности в случае отключения облака или нарушении целостности сети [11].

Интеллектуальные транспортные системы представляют собой многоуровневую киберфизическую систему, объединяющую транспортные средства, инфраструктуру и центры управления при помощи передовых коммуникационных и вычислительных технологий. Современные архитектуры ИТС используют V2X системы совместно с периферийными

вычислениями, машинным обучением и предиктивной аналитикой для достижения необходимого уровня управления [12]. Комбинируя локальные интеллектуальные возможности с глобальной координацией, ИТС может динамически оптимизировать транспортный поток, минимизировать заторы и повышать безопасность движения в сложных городских условиях.

В современных условиях транспортные средства и инфраструктура постоянно обмениваются информацией о состоянии системы, позволяя формировать полную картину экосистемы, корректно и эффективно принимать решения. Приложения, связанные с адаптивным управлением сигналами трафика, маршрутизацией приоритетов аварийных транспортных средств и прогнозированием столкновений, полагаются на обмен данными с малым временем ожидания через интерфейсы V2X, поддерживаемые граничными и туманными узлами [1].

Интеграция методов искусственного интеллекта (ИИ) позволяет этим системам учиться на статистических данных о дорожном движении, адаптироваться к изменениям окружающей среды и строить прогнозные модели в режиме реального времени. Так в работе [12] проводится анализ стратегии на основе ИИ для оптимизации V2X системы. Подчеркивается важность распределения ресурсов на основе данных в подключенных транспортных средствах и их положении и нагрузке.

Чтобы полностью реализовать потенциал ИТС, все больше внимания уделяется интегрированным архитектурам, которые объединяют коммуникацию, вычисления и контроль. Эти комплексные подходы сочетают в себе использование периферийных вычислителей и классические облачные подходы для обеспечения масштабируемости, совместимости и качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Такие гибридные системы обеспечивают распределенные управленческие ресурсы, координируют действия между локальными кластерами транспортных средств и глобальными платформами управления движением [2, 4, 9].

Для проверки этих интегрированных подходов были разработаны многочисленные экспериментальные платформы и тестовые базы. Реальные тестовые площадки V2X, такие как SVEA, Smart Highway и 5G-CCAM инфраструктуры, предоставляют важную информацию о задержках, надежности и масштабируемости в реальных условиях. Эти среды демонстрируют схему взаимодействия EN и FN, поддерживают приложения безопасности в режиме реального времени и обеспечивают управление данными модели [5, 7].

Несмотря на значительный прогресс в этой области, остаются нерешенными некоторые проблемы. Создание комплексной модели управления V2X системой в реальном времени с использованием парадигм туманных и граничных вычислителей, безопасное управление данными с сохранением конфиденциальности в гетерогенных сетях и эффективная разгрузка задач в условиях динамической мобильности. Для решения этих задач требуются усовершенствованные сетевые технологии, математические и алгоритмические модели, способные представлять взаимодействия между уровнями связи, вычислений и управления в единой структуре.

Эффективность системы зависит от ее способности управлять распределенными ресурсами, обеспечивать сверхнадежную связь с низкой задержкой и координировать принятие

решений между транспортными средствами и инфраструктурой. Создание программных решений, позволяющих проводить имитационное моделирование является одним из главных инструментов, используемых для подтверждения теоретических результатов. Сложность проведения реальных испытаний из-за их высокой стоимости вынуждает исследователей переходить к созданию испытательных стендов. Необходимость внедрения парадигмы туманных вычислений в уже хорошо зарекомендовавшую себя связку граница-облако служит дополнительной мотивацией к разработке новых платформ и вычислительных моделей, которые смогут фиксировать реальную производительность системы. Настоящая работа направлена на описание созданной имитационной модели, моделирование и экспериментальную проверку работоспособности системы, предназначенный для поддержки совместных, подключенных и автоматизированных сценариев мобильности.

Остальная часть статьи структурирована следующим образом: в разделе 1 представлен обзор существующей литературы в соответствующей предметной области. В разделе 2 проведено краткое описание наиболее популярных имитационных моделей. В третьем разделе приведен обзор программного комплекса simV2X. Описаны его структура реализации, общая схема, ключевые параметры моделирования, а также основные задачи и методы их решения. В разделе 4 приведен сценарий имитационного моделирования, а в пятом его анализ и численные результаты, направленные на проверку теоретических результатов и их анализ в различных конфигурациях системы. Наконец, в заключительном разделе приведены некоторые замечания и выводы.

### Обзор литературы

В последние годы активно ведутся исследования в области тестовых платформ и экспериментальных стендов, позволяющих проводить обмен данными в реальном времени между транспортными средствами. При этом формируется основа для анализа и подтверждения работоспособности технологий совместной, подключённой и автоматизированной мобильности транспорта (Cooperative Connected and Automated Mobility, CCAM). Современные работы направлены на решение двух ключевых задач: обеспечение воспроизводимости экспериментов в контролируемых условиях и перенос результатов моделирования со стендов на реальные дорожные условия с максимальной достоверностью.

Далее приведем наиболее значимые подходы, реализованные в виде программно-аппаратных решений для тестирования, визуализации и анализа V2X-систем и коммуникаций.

Одним из наиболее системных подходов к решению обозначенных задач является комплекс, описание которого представлено в работе [6]. Авторы разработали интегрированную модель «симуляция – полевые испытания», обеспечивающую последовательный переход от виртуальных сценариев к моделированию дорожной автономной системы. Архитектура программы включает в себя симулятор дорожной обстановки, промежуточный программный уровень (middleware) для генерации и маршрутизации V2X-сообщений и коммуникационные модули (OBU/RSU). Особое внимание уделено синхронизации временных шкал между виртуальной и физической моделями. Программное решение позволяет

интегрировать созданные в результате симуляции сообщения в радиоканал в режиме реального времени. Система снабжена инструментами анализа производительности (задержка, уровень потери пакетов), что позволяет сопоставлять данные, полученные в результате имитационного моделирования и дорожных испытаний. Приведенные авторами результаты позволяют заключить, что сценарии в модели воспроизводимы. Это позволяет выявлять различия между неточности в моделировании в сравнении с работой реальных каналов связи, включая влияние интерференции и джиттера. Таким образом, авторами закладывается основа для создания гибридных методик тестирования автономных систем, объединяющих преимущества анализа результатов стендового моделирования и сбора реальных данных.

Альтернативное исследование [9] связано с визуализацией и интерактивным мониторингом сообщений V2X. Подход к решению проблем в этой области позволяет существенно облегчить отладку и верификацию протоколов связи. Авторами представлена универсальная программная среда, предназначенная для анализа и отображения потоков V2X-сообщений в инфраструктуре «Smart Highway». Разработанное программное решение позволяет перехватывать, декодировать и отображать в реальном времени сообщения стандартов ETSI ITS-G5 и C-V2X. При этом проводится визуализация данных на географической карте. Программа поддерживает функции фильтрации сообщений по типу (CAM, DENM, SPAT/MAP), воспроизводит временную последовательность обмена и выявляет несоответствия между непосредственным позиционированием и фактическими данными GPS. Предложенный авторами гибкий веб-интерфейс и средства экспорта логов, программное решение существенно повышает наблюдаемость системы и снижает время на диагностику ошибок. Данный подход имеет важное значение для обеспечения прозрачности и воспроизводимости экспериментов на тестовых стендах.

Важную роль в развитии методологии комплексной оценки V2X-систем сыграла работа [13]. Авторами предложен комплекс для анализа производительности сетевых стеков, реализующих протоколы ITS-G5 и C-V2X, с возможностью управляемой подстройки параметров физического и канального уровней. Система представляет собой систему, состоящую из реальных устройств OBU/RSU, генераторов нагрузок и средств для автоматизации эксперимента. Предложенный метод предусматривает измерение ключевых метрик – коэффициента доставки пакетов (packet delivery ratio, PDR), задержки, джиттера и пропускной способности в различных сценариях движения транспорта и плотности трафика. Результаты моделирования показали значительное влияние аппаратных ограничений и характеристик радиоканала на надёжность передачи данных, а также позволили определить предельные значения параметров, обеспечивающих требуемый уровень качества обслуживания для различных классов приложений. Важно отметить, что в рассматриваемой работе сформирована воспроизводимая экспериментальная установка для количественного анализа эффективности V2X-системы.

Ряд исследований ориентирован на поддержку автономных транспортных средств. Так, в статье [14] описана тестовая платформа, предназначенная для оценки взаимодействия автономных автомобилей с элементами дорожной

инфраструктуры. Архитектура включает в себя придорожные устройства, серверы периферийных вычислений и интерфейсы взаимодействия с системами автономного вождения. Особое внимание уделено применению сообщений SPAT и MAP для улучшения прогнозирования фаз светофоров и управления движением. Экспериментальные результаты подтверждают гипотезу, что наличие этих сообщений снижает неопределённость при планировании траектории и повышает безопасность манёвров. В отличие от экспериментальных тестов, описанных в [13], основной акцент сделан на интеграцию коммуникационных и прикладных уровней, что важно для комплексной оценки систем автономного вождения.

Отметим еще один важный подход к построению оценки параметров взаимодействия элементов в V2X системах. В последние годы получила развитие идея открытых и модульных платформ. В работе [15] предложен универсальный экспериментальный стенд SVEA, предназначенный для оценки типовых сценариев для V2X-коммуникаций. Платформа поддерживает различные радиointерфейсы (ITS-G5, C-V2X), предоставляет API для быстрой конфигурации сценариев и автоматизированного сбора данных. Одной из ключевых особенностей SVEA является ориентация на воспроизводимость экспериментов вживую и возможность ретроспективного анализа экспериментов – все параметры среды и конфигурации сохраняются для последующих сравнений. В качестве примеров, реализован ряд сценариев, демонстрирующих влияние характеристик связи на показатели безопасности. Работа подчёркивает важность построения универсальных методов и открытого обмена экспериментальными данными для ускорения исследований в области CCAM.

Современное поколение тестовых комплексов представлено в статье [16]. Авторы сосредоточились на оценке производительности беспроводных систем нового поколения, включая NR-V2X и гибридные 5G-технологии, применительно к задачам кооперативного вождения. Разработанная система сочетает аппаратные компоненты (OBU/RSU с поддержкой современных PHY) и программные инструменты для измерения характеристик канала, анализа интерференции и подсчета нагрузок. Тесты проводились как в лабораторных условиях, так и в реальных городских локациях. Полученные результаты позволяют количественно оценить надёжность и задержку при передаче сообщений в сценариях с высокой плотностью трафика. Предложены рекомендации по проектированию систем CCAM. Работа выделяется масштабом и актуальностью, демонстрируя переход от экспериментальных прототипов к промышленным стандартам тестирования V2X-коммуникаций.

Сравнительный анализ приведённых исследований показывает эволюцию тестовых платформ от локальных, ориентированных на отдельные протоколы, к комплексным. Работы [6, 14, 16] акцентируют свое внимание на переносе моделей в физическую среду, формируя практику «simulation-to-road». Инструменты [9] обеспечивают визуализацию, а исследования [13, 15] развивают методы количественной оценки производительности и воспроизводимости. Общим для всех направлений остаётся стремление к стандартизации методик тестирования и расширению вариантов сценария: от базовых задач безопасности до высокоуровневых задач автономного планирования и кооперативного восприятия.

Несмотря на значительный прогресс, остаются

нерешёнными вопросы масштабирования стендовых испытаний, адаптации тестовых комплексов (тестбенч) к быстро эволюционирующим радиостандартам (5G NR-V2X, 6G). Проблема воспроизводимости данных в различных конфигурациях системы и оборудования также требует дополнительного внимания. В этом контексте актуальными направлениями становятся разработка унифицированных интерфейсов между симуляторами и реальными устройствами, применение технологий цифровых двойников (Digital Twins) и использование открытых платформ, подобных SVEA, для кросс-сравнения результатов.

Подводя итог, отметим, что современная экосистема тестовых комплексов V2X формирует фундамент для надёжной и стандартизированной оценки систем CCAM. Эволюция инструментов от отдельных лабораторных экспериментов к полнофункциональным интегрированным средам обеспечивает возможность системного анализа всех уровней – от физического канала до приложений автономного управления. Такие решения создают предпосылки для разработки унифицированных стандартов испытаний и ускоряют внедрение исследовательских технологий в реальные транспортные системы.

### Обзор имитационных моделей

Имитационное моделирование (ИМ) – это метод исследования сложных систем, при котором создаётся модель, воспроизводящая их поведение во времени в приближённых или виртуальных условиях. В контексте систем связи и транспортных сетей имитационное моделирование позволяет исследовать характеристики передачи данных в динамических сценариях (движение транспортных средств, изменение расстояний, прерывания связи), анализировать поведение сети при различных параметрах, оценивать надёжность, задержку, сквозную пропускную способность.

ИМ может проводиться с учетом дискретного времени, где объекты взаимодействуют в вычислительной среде с шагом времени или с без учета дискретного времени, то есть в реальном времени.

При моделировании с учетом дискретного времени, при одинаковых входных данных, модель даёт идентичный результат. Можно ускорять или замедлять время, поддерживая масштабные сценарии с сотнями или тысячами узлов, где невозможно моделировать всё в реальном времени.

Моделирование в реальном времени выполняется синхронно с системными часами – каждое событие или кадр моделируется на лету в соответствии с системным временем. Такой подход используется, например, в тестовых полигонах (testbeds) и гибридных цифровых двойниках, где симулятор напрямую связан с физическими устройствами. Возможна интеграция с устройствами (RSU, OBU, mRSU, сенсоры, контроллеры). Подходит для тестирования систем управления, где требуется мгновенная реакция на изменяющиеся условия в реальном времени.

Современные инструменты имитационного моделирования можно условно разделить на три группы:

1. Универсальные платформы системной динамики и агентного моделирования.
2. Сетевые симуляторы и фреймворки для моделирования протоколов связи.

3. Транспортные симуляторы и гибридные среды взаимодействия.

К первой группе можно отнести такое программное решение, как AnyLogic. AnyLogic – это коммерческая мультипарадигмальная среда моделирования, поддерживающая дискретно-событийное моделирование (DES), агентное моделирование (ABM) и системную динамику (SD). Она может применяться для имитации транспортных потоков, логистических процессов, систем управления и городских инфраструктур.

Ко второй группе относят, например, модульную библиотеку и фреймворк OMNeT++ или сетевой симулятор NS-3. OMNeT++ – одна из наиболее развитых платформ для моделирования телекоммуникационных систем. Она реализует дискретно-событийную архитектуру и имеет модульную структуру: каждая сущность сети (узел, канал, пакет) представлена в виде самостоятельного модуля с параметрами. На базе OMNeT++ разработано несколько фреймворков для V2X:

- INET Framework – моделирование IP-сетей, Wi-Fi, LTE, 5G NR;
- Veins – интеграция с транспортным симулятором SUMO для моделирования движения автомобилей.

Они позволяют высокоточно моделировать сетевые уровни (MAC, PHY, IP, UDP/TCP), с учетом точных задержек, ошибок и потерь.

NS-3 – это инструмент для моделирования сетевых стеков. Он включает модели физических уровней (Wi-Fi, LTE, 5G NR), протоколов MAC, маршрутизации и транспортных слоёв. Возможность интеграции с Linux network stack, что позволяет физически моделировать сетевые взаимодействия. NS-3 подходит для проведения комплексных экспериментов на уровне физического и канального слоя, но плохо сочетается с внешними системами моделирования транспорта и цифровыми двойниками.

К транспортным симуляторам (третья группа), относят SUMO и SVEA. SUMO (Simulation of Urban Mobility) – это открытый симулятор, ориентированный на моделирование транспортных потоков и маршрутизации автомобилей. SUMO используется как геометрическая подложка для сетевых симуляторов, например, в связке с OMNeT++ через интерфейс TraCI (Traffic Control Interface).

SVEA (Swedish Vehicle Electronics Architecture) – это аппаратно-программный тестовый стенд (testbed), созданный в Королевском технологическом институте (KTH, Швеция) для проведения экспериментов в области V2X-коммуникаций и автономного вождения. В отличие от классических программных симуляторов (таких как OMNeT++, NS-3 или SUMO), SVEA представляет собой реальную физическую платформу, на которой выполняются наиболее реалистичные эксперименты с транспортными средствами, RSU и сетевыми модулями связи.

Авторами ранее был разработан собственный инструмент имитационного моделирования VANET 2.0.0 [17, 18], который позволял проводить эксперименты в реальном времени, позволяет комплексно подходить к анализу параметров V2X системы, делая акцент на потерях при передаче данных. При этом программный модуль не мог интегрироваться с другими платформами и базами данных.

## Программный комплекс simV2X

Современные исследования в области интеллектуальных транспортных систем и технологий V2X требуют наличия гибких, масштабируемых и расширяемых инструментов имитационного моделирования.

Представляемый программный комплекс simV2X [19, 20] разработан в целях моделирования взаимодействий между транспортными средствами, объектами дорожной инфраструктуры и элементами периферийных вычислений в условиях городской транспортной среды [21, 22].

Представляемый программный комплекс simV2X разработан в целях моделирования взаимодействий между транспортными средствами, объектами дорожной инфраструктуры и элементами сети в условиях городской транспортной среды.

Программа реализована на языке Python с использованием FastAPI для серверной логики и OpenLayers для клиентской визуализации. Графовая карта дорог получена с использованием OpenStreetMap. Программа позволяет выполнять пошаговое моделирование транспортной сети, формировать сценарии движения транспортных средств, а также управлять поведением агентов и дорожной инфраструктуры.

Пример визуализации реализованного программного решения приведен на рисунке 1.



Рис. 1. Визуализация имитационной модели

Архитектура simV2X модульная, что обеспечивает её расширяемость и адаптируемость под различные задачи. Каждый ключевой элемент модели представлен отдельным программным классом, реализующим соответствующий уровень или функциональную подсистему.

Все сущности описываются с помощью моделей Pydantic, что обеспечивает строгую типизацию и сериализацию данных при обмене по WebSocket/REST.

В качестве примера и для работы с базой данных, реализован AppStepSimulatorDB, выполняющий расчеты и записывающий их в базу данных SQLite.

В таблице 3 приведены основные классы, реализуемые в программном модуле имитационного моделирования simV2X.

Таблица 3

Основные классы, реализуемые в программном модуле

Объект	Описание	Основные параметры
Node	Базовый класс сетевого узла. Содержит общие параметры передатчика и антенны.	id, position, tx_power_dbm, antenna_gain_tx_db, antenna_gain_rx_db, system_loss_db
Vehicle (OBU)	Подвижный узел, представляющий транспортное средство с маршрутом и направлением движения.	id, Coordinates, speed_mps, heading_deg, route_id
RSU	Стационарный узел дорожной инфраструктуры. Обеспечивает связь с OBU.	id, Coordinates, range_m, antenna_gain_db
mRSU	Мобильный узел инфраструктуры, размещённый на транспортном средстве.	id, Vehicle, status, tx_power_dbm
Route	Маршрут, состоящий из точек пути, по которым движется транспортное средство.	id, path: List[Coordinates]
CurveRepositor	Хранилище BLER-кривых по комбинации (phy, mcs, channel).	register(), get()
AirtimeModel	Расчёт длительности передачи пакета и PER из BER или BLER-кривой.	net_bitrate_bps(), payload_airtime_s(), total_airtime_s()
Simulator	Основной симулятор: хранит узлы, создаёт каналы, выполняет шаги моделирования.	nodes, link_by_pair, default_link, summary()
AppStepSimulatorDB	Расширенный симулятор, ведущий логирование событий в базу данных SQLite.	step(), _deliver_db(), max_range_friis_m()
TrafficSource	Источник трафика. Определяет генерацию пакетов во времени.	src_id, start_s, end_s
GenericSource	Универсальный источник пользовательского трафика.	dst_id, size_bytes, period_s
SQLiteStorage	Менеджер логирования в базу данных SQLite.	log_packet(), log_reception(), schedule_packet()

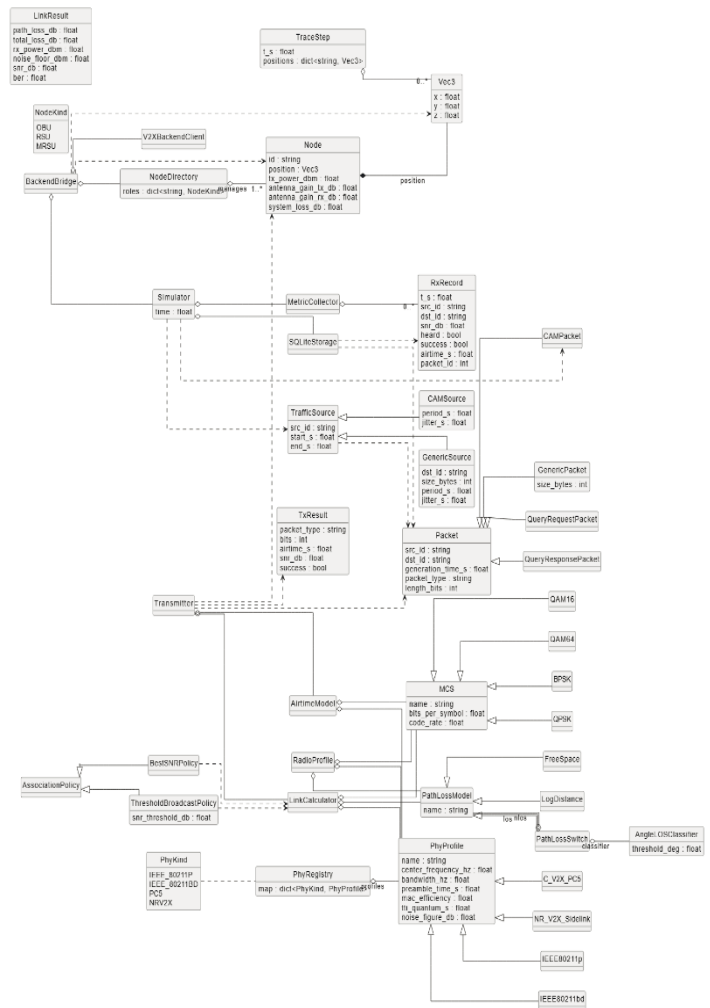


Рис. 2. Схема работы имитационной модели

Схема работы имитационной модели приведена на рисунке 2.

Результаты моделирования сохраняются в SQLite в виде таблиц (рис. 3):

1. packets – все переданные пакеты;
2. receptions – результаты приёма с SNR, успехом и airtime;
3. summary – агрегированные показатели PDR, средний SNR, эфирное время.

Эти данные могут быть экспортированы в CSV, визуализированы средствами Python (библиотеки pandas, matplotlib) или сторонними программами.

Перейдем к рассмотрению основных компонент, реализованных в simV2X.

Signal-to-Noise Ratio (SNR) – это отношение мощности полезного сигнала к мощности шума на приёмной стороне, выражаемое в децибелах (дБ). В simV2X этот показатель используется как основной критерий для оценки качества радиоканала и расчёта вероятности ошибок (BER, PER).

Рис. 3. Результаты моделирования в SQLite

Расчетная формула:

$$SNR_{dB} = P_r - N_0,$$

где  $P_r$  – мощность принимаемого сигнала в дБм,  $N_0$  – мощность шума в полосе канала, вычисляемая по следующей схеме:

$$N_0 = -174 + 10 \log_{10}(B)$$

где  $B$  – ширина полосы в Гц.

При высоком SNR (> 15 дБ) канал считается надёжным (вероятность ошибок мала), при низком SNR (< 5 дБ) растёт вероятность ошибок и потерь пакетов, а при SNR ниже чувствительности (Modulation and Coding Scheme, MCS) передача невозможна. SNR напрямую влияет на Bit Error Rate (BER) и Packet Error Rate (PER), определяя вероятность успешного приёма пакета.

Bit Error Rate (BER) – вероятность ошибки отдельного бита при передаче через радиоканал. В simV2X этот показатель рассчитывается на основе выбранной схемы модуляции и отношения сигнал/шум (SNR).

Packet Error Rate (PER) – вероятность того, что хотя бы один бит в пакете передан ошибочно, т.е. весь пакет не будет принят корректно. Реализуется в методе `AirtimeModel.per_from_ber` (bits, ber).

Packet Delivery Ratio (PDR) – доля успешно доставленных пакетов от общего количества, переданных за период моделирования.

`Airtime` – это время, в течение которого пакет занимает эфир. Зависит от полезной нагрузки, пропускной способности канала и накладных расходов PHY. Рассчитывается в `AirtimeModel.total_airtime_s` (bits).

Расчетная формула:

$$T_{air} = T_{preamble} + \frac{N_{bits}}{R_{net}},$$

где  $T_{preamble}$  – время преамбулы и служебных полей,  $N_{bits}$  – количество бит в пакете,  $R_{net}$  – эффективная скорость передачи (с учетом MAC efficiency и spectral efficiency).

Path Loss (PL) – ослабление мощности радиосигнала между передатчиком и приёмником вследствие распространения в пространстве. В simV2X реализованы модели 3GPP и обычного логарифмического расстояния. Для определения PL требуется определить LOS и NLOS. Решение о том, является ли связь прямой (LOS) или непрямой (NLOS), принимается на основе пространственного положения и ориентации транспортного средства.

Для определения уровня доступности устройства в соответствии и уровнем сигнал-шум, с учетом прямой или непрямой видимости в имитационной модели реализуется с использованием алгоритма, представленного на рисунке 4.

Алгоритм определяет, какие устройства (OBU, RSU, mRSU) могут «услышать» конкретное устройство в пределах сети. Его работа основана на сравнении параметров передаваемого сигнала с пороговыми характеристиками приёмников других устройств, а также на учёте расстояния и углового положения между объектами.

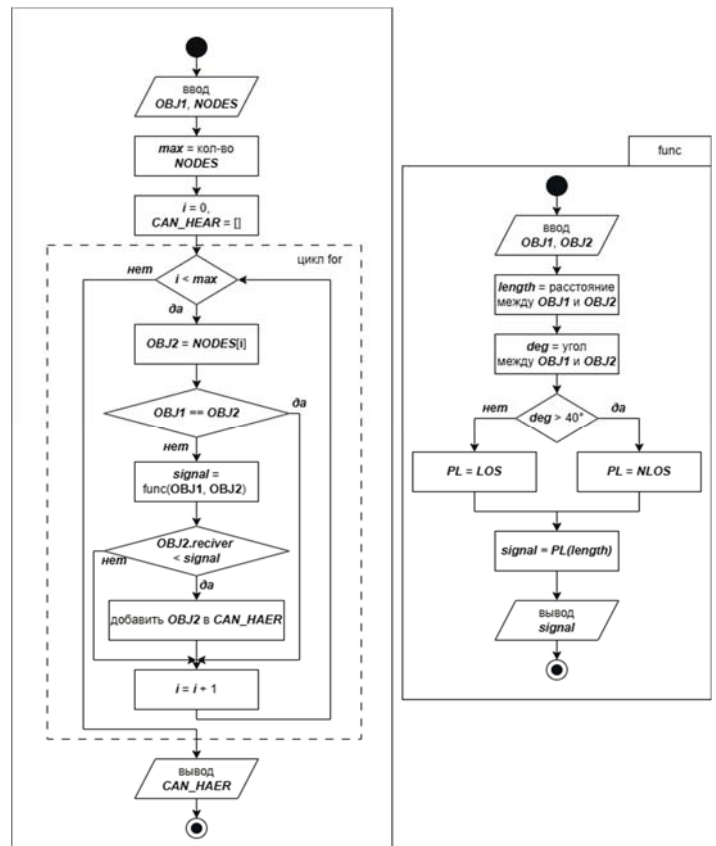


Рис. 4. Алгоритм определения уровня доступности устройства

Входными данными алгоритма являются объект OBJ1, представляющий устройство, для которого определяется зона слышимости, и множество NODES, содержащее все устройства сети, включая OBJ1. Переменная `max` задаёт количество элементов множества NODES, а переменная `CAN_HEAR` инициализируется как пустое множество, в которое будут добавляться устройства, способные принять сигнал от OBJ1, исключая сам OBJ1. Далее выполняется цикл по всем элементам множества NODES.

Для каждого устройства из NODES проверяется, не совпадает ли оно с OBJ1; если совпадает, итерация пропускается, поскольку устройство не может передавать сигнал само себе. В противном случае вызывается вспомогательная функция, обозначенная на рисунке как `func`, которая вычисляет уровень сигнала, получаемого устройством OBJ2 от источника OBJ1.

После получения значения сигнала выполняется проверка условия: если порог чувствительности приёмника устройства OBJ2 меньше рассчитанного значения сигнала, то есть устройство способно принять передачу, OBJ2 добавляется в множество `CAN_HEAR`. После завершения цикла результатом работы алгоритма становится множество `CAN_HEAR`, содержащее все устройства, находящиеся в зоне слышимости OBJ1.

Функция `func(OBJ1, OBJ2)` моделирует распространение сигнала между двумя устройствами. На вход она получает те же объекты OBJ1 и OBJ2. Внутри функции вычисляются расстояние `length` между объектами и угол `deg` между направлениями их антенн.

На основании значения угла определяется тип распространения сигнала: если  $\text{deg}$  не превышает  $40^\circ$ , предполагается наличие прямой видимости Line of Sight (LOS), иначе считается, что сигнал распространяется с препятствиями Non-Line of Sight (NLOS). Далее определяется функция потерь сигнала PL, соответствующая выбранному типу распространения, и вычисляется итоговый уровень сигнала  $\text{signal} = \text{PL}(\text{length})$ , который возвращается в основной алгоритм. Для определения распространения сигнала может использоваться не только расстояние, передаются все необходимые данные от объектов, однако для данного сценария достаточно считать расстояние. Функцией потери сигнала могут являться модели 3GPP, Hata или другие.

Для каждого узла (транспортного средства или инфраструктурной точки) известны координаты  $(x, y)$  и направление движения (вектор ориентации, выраженный через угол  $\text{heading\_deg}$ ). Для пары узлов А (передатчик) и В (приёмник) вычисляется вектор направления на приёмник:

$$\vec{v}_{AB} = (x_B - x_A, y_B - y_A)$$

Затем определяется угол отклонения между направлением движения передатчика (вектор ориентации автомобиля) и направлением на приёмник:

$$\theta = \arccos \left( \frac{|\vec{v}_{\text{heading}} \cdot \vec{v}_{AB}|}{|\vec{v}_{\text{heading}}| \cdot |\vec{v}_{AB}|} \right)$$

где  $\vec{v}_{\text{heading}}$  – единичный вектор направления движения А,  $\vec{v}_{AB}$  – нормализованный вектор на приёмник В.

После вычисления угла, сравнивается значение углового порога. Считаем, что для NLOS отклонение превышает  $40^\circ$  градусов. Таким образом, если приёмник находится в пределах  $40^\circ$  перед направлением движения автомобиля – считается, что между ними прямая видимость (LOS). Если приёмник расположен позади или под большим углом – канал считается затенённым (NLOS). Это наиболее простое динамическое определение LOS/NLOS. Альтернативным методом мог бы выступать «RayCasting» – запуск лучей до точек. Однако, в таком случае, необходимо было бы иметь координаты возможных препятствий на пути.

### Сценарий имитационного моделирования

При проведении реальных испытаний возникает необходимость формирования предварительной статистической информации о тех или иных параметрах системы. Так, для определения плотности распределения RSU на перекрестках, необходимо определить силу влияния прямой видимости устройства на обработку сообщения.

Был рассмотрен сценарий (рис. 5), в котором предполагается, что устройство OBU не имеет прямой видимости с RSU, но находится в зоне действия mRSU, которое, в свою очередь, имеет прямую видимость с RSU. Таким образом, связь между OBU и RSU – NLOS (без прямой видимости), между mRSU и RSU – LOS (с прямой видимостью), между OBU и mRSU – LOS (с прямой видимостью).

Исходное предположение заключается в том, что передача данных по цепочке LOS–LOS может обеспечивать

меньшие задержки по сравнению с прямой передачей по каналу NLOS. Схема сценария приведена на рисунке 4. В рассматриваемом случае также предполагается, что mRSU и RSU не взаимодействуют с другими OBU. mRSU выполняет роль ретранслятора, передавая задачу на RSU, при этом не располагая кэшированными результатами. В то же время RSU содержит уже закэшированный результат, что исключает необходимость ожидания отклика от ES или облачной инфраструктуры. OBU должно находиться в зоне покрытия RSU, т.е. сигнал должен быть «услышан». В сценарии используется модель распространения 3GPP в городской среде.

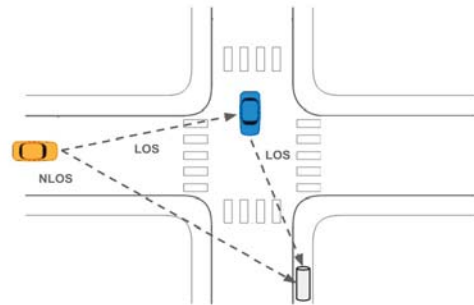


Рис. 5. Сценарий имитационного моделирования

Скорости транспортных средств назначались случайным образом в начале каждого повтора моделирования. Скорость OBU от 30 до 60 км/ч. Скорость mRSU от 20 до 45 км/ч. Высота антенны OBU составляет 1.5 метра, mRSU – 4 метра, RSU – 10 метров. Моделирование проводилось с характеристиками IEEE 802.11bd, на частоте 5.9 ГГц. Коэффициент шума 7.0 дБ, расчетная мощность шума ~ -97 дБм.

### Результаты имитационного моделирования

Для проверки работоспособности предложенной архитектуры ретрансляции было проведено имитационное моделирование сценария, описанного в предыдущем разделе. Целью моделирования является сравнение качества связи (SNR) при прямой передаче данных от OBU к RSU и при передаче через мобильный ретранслятор mRSU. Для анализа были использованы две конфигурации модели канала:

1. Каналу OBU-RSU статически присвоен тип NLOS, а каналам OBU-mRSU и mRSU-RSU – тип LOS, в соответствии с базовой гипотезой.
2. Тип канала (LOS или NLOS) для OBU-RSU и mRSU-RSU определяется динамически.

На рисунке 6 представлены результаты моделирования первой конфигурации. Синяя пунктирная линия показывает SNR для прямого канала. Качество связи нелинейно и достигает пика в точке максимального сближения OBU с RSU. После этой точки SNR быстро деградирует, опускаясь ниже порога работоспособности. Зеленая сплошная линия показывает SNR канала через ретранслятор. Поскольку OBU и mRSU движутся (OBU догоняет mRSU), SNR этого канала плавно растет. Хотя прямой канал (синий) временно обеспечивает более высокий SNR вблизи RSU, он полностью теряет работоспособность на дистанции. Канал через ретранслятор (зеленый), напротив, обеспечивает стабильно высокий SNR на всем смоделированном диапазоне, решая задачу расширения зоны покрытия V2X.

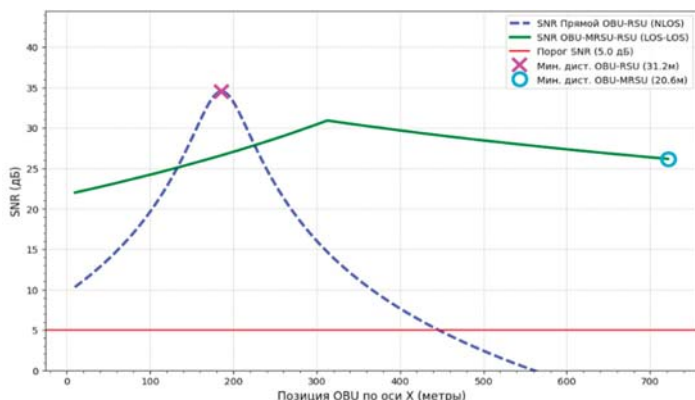


Рис. 6. Результаты моделирования в первой конфигурации

На рисунках 7 и 8 представлена вторая конфигурация, где модель канала динамически переключается с LOS на NLOS, когда OBU или mRSU удаляются от RSU. Синяя линия демонстрирует пик в зоне LOS, однако, как только OBU теряет RSU из видимости, модель канала переключается на NLOS и это приводит к мгновенному падению SNR. После этого обрыва канал быстро деградирует и становится неработоспособным. Зеленая линия показывает SNR ретранслятора. Этот SNR определяется самым низким уровнем из двух взаимодействий. На графиках (рис. 7 и 8) виден резкий вертикальный обрыв зеленой линии. Это происходит в тот момент, когда мобильный mRSU покидает зону видимости RSU, и его канал деградирует до NLOS, мгновенно становясь узким местом всей цепи ретрансляции. Тем не менее, сигнал ретрансляции деградирует позднее, чем прямое соединение.

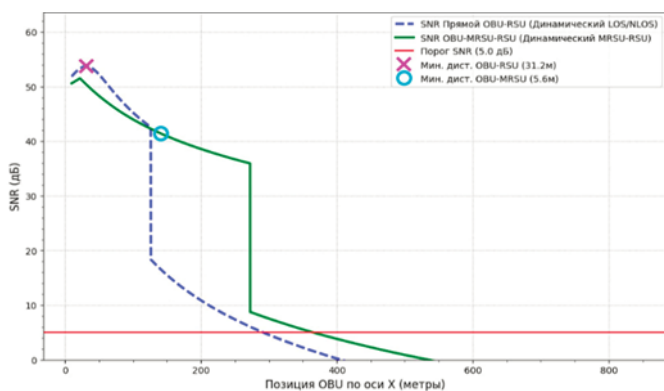


Рис. 7. Результаты моделирования во второй конфигурации

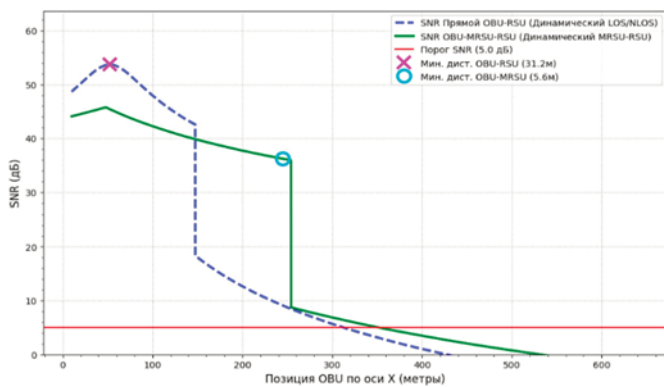


Рис. 8. Результаты моделирования во второй конфигурации

Конечно, реальное падение будет проходить несколько плавнее, резкий спад обусловлен переключением моделей. Ретрансляция mRSU эффективна только тогда, когда оба ее сегмента (OBU-mRSU, mRSU-RSU) имеют высокий SNR. Преимущество от mRSU проявляется на больших расстояниях, где быстрое затухание прямого NLOS-канала делает его неработоспособным, в то время как mRSU продолжает обеспечивать связь. mRSU позволяет расширить зону покрытия, но эта зона все равно ограничена моментом, когда сам mRSU теряет LOS-связь с RSU.

### Заключение

Проведённое исследование посвящено разработке системы имитационного моделирования V2X-сетей и оценке эффективности архитектуры, использующей мобильный узел туманных вычислений в качестве ретранслятора между бортовыми устройствами и стационарной дорожной инфраструктурой [23].

Проведенное имитационное моделирование в условиях отсутствия прямой видимости показало, что передача по каналу связи между OBU и RSU характеризуется быстрым нелинейным затуханием сигнала. Использование mRSU обеспечивает устойчивое качество передачи только на больших расстояниях, где прямой канал связи уже не имеет возможности для функционирования. На малых расстояниях преимущество ретрансляции выражено незначительно.

Имитационное моделирование подтвердило, что геометрия и высота антенн являются ключевыми факторами для стабильной настройки канала для передачи данных. Низкое положение антенны OBU (около 1,5 м) приводит к быстрому переходу в режим NLOS, что вызывает мгновенное снижение уровня SNR. При этом использование mRSU с антенной высотой около 4 м позволяет дольше сохранять прямую видимость с RSU и эффективно ретранслировать данные, расширяя рабочую зону покрытия для OBU.

Эффективность функционирования системы OBU-mRSU-RSU определяется наиболее слабым звеном – каналом между mRSU и RSU. При увеличении расстояния между ними свыше порога прямой видимости наблюдается деградация канала, что приводит к потере связи всей системы. Это подчёркивает необходимость разработки алгоритмов прогнозирования потери соединения и выбора оптимальных ретрансляторов в динамической среде.

Разработанная система имитационного моделирования подтвердила, что использование мобильных узлов туманных вычислений в качестве ретрансляторов является эффективным способом повышения надёжности связи в городской среде.

Следующим этапом исследования в рассматриваемой области является разработка адаптивных алгоритмов выбора ретранслятора с учётом не только уровня SNR, но и прогнозируемого времени потери прямой видимости в канале между mRSU и RSU. Предусматривается внедрение моделей многолучевого распространения Релея и Райса для учёта замираний и отражений в городских условиях. Также планируется провести оценку влияния использования mRSU на общую пропускную способность и задержку передачи данных в системе с учётом двухзвенного канала связи.

**Поддержка исследований.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00304, <https://rscf.ru/project/24-29-00304/>

### Литература

1. Wang J., Topilin I., Feofilova A., Shao M., Wang Y. Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies on Road Safety and Traffic Efficiency // *Sensors*. 2025. Vol. 25, pp. 2132. DOI: 10.3390/s25072132.
2. Zhang X., Li J., Zhou J. et al. Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy // *Automot. Innov.* 2025. Vol. 8, pp. 13-45. DOI: 10.1007/s42154-024-00310-2.
3. Pawar V. et al. Intelligent Transportation System With 5G Vehicle-to-Everything (V2X): Architectures Vehicular Use Cases, Emergency Vehicles, Current Challenges, and Future Directions // *IEEE Access*. 2022. Vol. 12, pp. 183937-183960. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3506815.
4. Khan A.A., Laghari A.A., Shafiq M., Awan S.A., Gu Z. Vehicle to Everything (V2X) and Edge Computing: A Secure Lifecycle for UAV-Assisted Vehicle Network and Offloading with Blockchain // *Drones*. 2022. Vol. 6. P. 377. DOI: 10.3390/drones6120377.
5. Rehman M. A. U., Salah ud din M., Mastorakis S., Kim B.-S. FoggyEdge: An Information-Centric Computation Offloading and Management Framework for Edge-Based Vehicular Fog Computing // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2023. Vol. 15. No. 5, pp. 78-90. DOI: 10.1109/MITS.2023.3268046.
6. Elmoghazy A., Elgazzar K., Alwidian S. A Real-World Testbed for V2X in Autonomous Vehicles: From Simulation to Actual Road Testing // *IEEE 8th International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC)*. Philadelphia. PA. USA. 2024, pp. 1234-1245. DOI: 10.1109/ICFEC61590.2024.00012.
7. Ning Z., Huang J., Wang X. Vehicular Fog Computing: Enabling Real-Time Traffic Management for Smart Cities // *IEEE Wireless Communications*. 2019. Vol. 26. No. 1, pp. 87-93. DOI: 10.1109/MWC.2019.1700441.
8. Glazkov R., Moltchanov D., Srikanteswara S., Samuylov A., Arrobo G., Zhang Y., Feng H., Himayat N., Spoczynski M., Koucheryavy Y. Provisioning of Fog Computing over Named-Data Networking in Dynamic Wireless Mesh Systems // *Sensors*. 2024. Vol. 24. P. 1120. DOI: 10.3390/s24041120.
9. De Britto e Silva E., Vranckx J., De Bruyn T., Charpentier V., Hadiwardoyo S. A., Marquez-Barja J. M. A Toolkit for Visualizing V2X Messages on the Smart Highway Testbed // *2021 IEEE/ACM 25th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. Valencia. Spain. 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/DS-RT52167.2021.9576123.
10. Thakur A., Malekian R. Fog Computing for Detecting Vehicular Congestion, an Internet of Vehicles Based Approach: A Review // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2019. Vol. 11. No. 2, pp. 8-16. DOI: 10.1109/MITS.2019.2903551.
11. Ma H., Wu Y., Tong Y. Research on the Application and Optimization of V2X Communication Technology for Intelligent Transportation // *International Core Journal of Engineering*. Vol. 11. No. 6, pp. 363-376. DOI: 10.6919/ICJE.202506\_11(6).0040.
12. Tong W., Hussain A., Bo W. X., Maharjan S. Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 10823-10843. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891073.
13. Duan X., Yang Y., Tian D., Wang Y., Li T. A V2X communication system and its performance evaluation test bed. // *2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014)*. Vancouver. BC. Canada. 2014, pp. 1-2. DOI: 10.1109/WIVEC.2014.6953212.
14. Bouchemal N., Kallel S. Testbed of V2X infrastructure for autonomous vehicles // *Ann. Telecommun.* 2021. Vol. 76, pp. 731-743. DOI: 10.1007/s12243-021-00880-w.
15. Jiang F. J., Al-Janabi M., Bolin T., Johansson K. H., Mårtensson J. SVEA: an experimental testbed for evaluating V2X use-cases // *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Macau. China. 2022, pp. 3484-3489. DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922544.
16. Dakić A., et al. Wireless V2X Communication Testbed for Connected, Cooperative and Automated Mobility // *2024 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. Kobe. Japan. 2024, pp. 9-16. DOI: 10.1109/VNC61989.2024.10575958.
17. Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladuko A. VANET Ver. 2.0.0 – Software Module for Modeling the Interaction of Edge Devices, 2024. URL: <https://github.com/quanuhs/VANET> (accessed 01.11.2025).
18. Тамбовцев Г.И., Плотников П.В., Владыко А.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664933 Российская Федерация. Программный модуль баланса нагрузки на объектах V2X системы : заявл. 26.05.2025 : опубл. 09.06.2025.
19. Tambovtsev G., Plotnikov P., Vladuko A. SimV2X – Software Module for Modeling the Interaction of Edge and Fog Devices, 2025. URL: <https://github.com/quanuhs/simV2X> (accessed 01.11.2025).
20. Тамбовцев Г.И., Плотников П.В., Владыко А.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689008 Российская Федерация. Программный модуль системы имитационного моделирования V2X среды (simV2X): заявл. 23.10.2025 : опубл. 23.10.2025.
21. Vladuko A., Plotnikov P., Tambovtsev G. Simulation-Based Evaluation of V2X System with Variable Computational Infrastructure // *Network*. 2025. Vol. 5. No. 1. P. 4. DOI: 10.3390/network5010004.
22. Plotnikov P. V., Tambovtsev G. I., Vladuko A. G. The Balance Model for V2X System with Variable Infrastructure // *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow. Russian Federation. 2025, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948102.
23. Plotnikov P. V., Tambovtsev G. I., Vladuko A. G. Performance Evaluation of V2X Model with a Mobile Road Side Units // *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. Moscow. Russian Federation. 2023, pp. 1-4. DOI: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332617.

## V2X-BASED ITS SIMULATION SYSTEM

**Pavel V. Plotnikov**, SPbSUT, St. Petersburg, Russia, [plotnikov.pv@sut.ru](mailto:plotnikov.pv@sut.ru)  
**Gleb I. Tambovtsev**, SPbSUT, St. Petersburg, Russia, [tambovcev.gi@sut.ru](mailto:tambovcev.gi@sut.ru)  
**Andrei G. Vladyko**, SPbSUT, St. Petersburg, Russia, [vladyko@sut.ru](mailto:vladyko@sut.ru)

*This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 24-29-00304, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00304/>*

**Abstract**

The paper discusses a simulation system for intelligent transportation systems (ITS) based on Vehicle-to-Everything (V2X) communication technology. The development objective is to create a tool for analyzing the interaction processes between vehicles and road infrastructure elements, taking into account the specific characteristics of the urban environment. The developed software package simV2X allows for reproducible data exchange scenarios, vehicle movement modeling, and assessment of how communication noise affects the efficiency of interactions within a dynamic system. The system architecture follows a modular design, providing flexibility in parameter configuration, functional expansion, and adaptation to various application tasks. The paper presents a simulation scenario in which a mobile infrastructure node operates as a relay between a vehicles on-board unit and a stationary data transmission unit known as mobile roadside unit. The experimental results demonstrate differences in communication quality between direct and relay-based message exchange and reveal the influence of spatial positioning and object dynamics on connection stability. The obtained data can be applied to evaluate the efficiency of distributed ITS architectures, optimize the placement of infrastructure elements, and plan further experimental studies in the field of cooperative and automated mobility.

**Keywords:** ITS, edge and fog computing, V2X system, simulation, simV2X

**References**

- [1] J. Wang, I. Topilin, A. Feofilova, M. Shao, Y. Wang, "Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies on Road Safety and Traffic Efficiency," *Sensors*, 2025, vol. 25, pp. 2132, doi: 10.3390/s25072132.
- [2] X. Zhang, J. Li, J. Zhou, et al. "Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy," *Automot. Innov.*, 2025, vol. 8, pp. 13-45, doi: 10.1007/s42154-024-00310-2.
- [3] V. Pawar et al. "Intelligent Transportation System With 5G Vehicle-to-Everything (V2X): Architectures, Vehicular Use Cases, Emergency Vehicles, Current Challenges, and Future Directions," *IEEE Access*, 2025, vol. 12, pp. 183937-183960, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3506815.
- [4] A.A. Khan, A.A. Laghari, M. Shafiq, S.A. Awan, Z. Gu, "Vehicle to Everything (V2X) and Edge Computing: A Secure Lifecycle for UAV-Assisted Vehicle Network and Offloading with Blockchain," *Drones*, 2022, vol. 6, pp. 377, doi: 10.3390/drones6120377.
- [5] M. A. U. Rehman, M. Salah ud din, S. Mastorakis and B. -S. Kim, "FoggyEdge: An Information-Centric Computation Offloading and Management Framework for Edge-Based Vehicular Fog Computing," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2023, vol. 15, no. 5, pp. 78-90, doi: 10.1109/MITS.2023.3268046.
- [6] A. Elmoghazy, K. Elgazzar, S. Alwidian, "A Real-World Testbed for V2X in Autonomous Vehicles: From Simulation to Actual Road Testing," *IEEE 8th International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC)*. Philadelphia. PA. USA, 2024, pp. 1234-1245, doi: 10.1109/ICFEC61590.2024.00012.
- [7] Z. Ning, J. Huang and X. Wang, "Vehicular Fog Computing: Enabling Real-Time Traffic Management for Smart Cities," *IEEE Wireless Communications*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 87-93, doi: 10.1109/MWC.2019.1700441.
- [8] R. Glazkov, D. Moltchanov, S. Srikanthswara, A. Samuylov, G. Arrobo, Y. Zhang, H. Feng, N. Himayat, M. Spoczynski, Y. Koucheryavy, "Provisioning of Fog Computing over Named-Data Networking in Dynamic Wireless Mesh Systems," *Sensors*, 2024, vol. 24, pp. 1120, doi: 10.3390/s24041120.
- [9] E. De Britto e Silva, J. Vranckx, T. De Bruyn, V. Charpentier, S. A. Hadiwardoyo and J. M. Marquez-Barja, "A Toolkit for Visualizing V2X Messages on the Smart Highway Testbed," *2021 IEEE/ACM 25th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, Valencia, Spain, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/DS-RT52167.2021.9576123.
- [10] A. Thakur, R. Malekian, "Fog Computing for Detecting Vehicular Congestion, an Internet of Vehicles Based Approach: A Review," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 8-16, doi: 10.1109/MITS.2019.2903551.
- [11] H. Ma, Y. Wu, Y. Tong, "Research on the Application and Optimization of V2X Communication Technology for Intelligent Transportation," *International Core Journal of Engineering*, 2025, Vol. 11, no. 6, pp. 363-376, doi: 10.6919/ICJE.202506\_11(6).0040.
- [12] W. Tong, A. Hussain, W. X. Bo, S. Maharjan, "Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey," *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 10823-10843, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2891073.
- [13] X. Duan, Y. Yang, D. Tian, Y. Wang, T. Li, "A V2X communication system and its performance evaluation test bed," *2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014)*, Vancouver, BC, Canada, 2014, pp. 1-2, doi: 10.1109/WIVEC.2014.6953212.
- [14] N. Bouchemal, S. Kallel, "Testbed of V2X infrastructure for autonomous vehicles," *Ann. Telecommun.*, 2021, vol. 76, pp. 731-743, doi: 10.1007/s12243-021-00880-w.
- [15] F. J. Jiang, M. Al-Janabi, T. Bolin, K. H. Johansson and J. Martensson, "SVEA: an experimental testbed for evaluating V2X use-cases," *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Macau, China, 2022, pp. 3484-3489, doi: 10.1109/ITSC55140.2022.9922544.

- [16] A. Dakic et al., "Wireless V2X Communication Testbed for Connected, Cooperative and Automated Mobility," *2024 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Kobe, Japan, 2024, pp. 9-16, doi: 10.1109/VNC61989.2024.10575958.
- [17] Plotnikov P., Tambovtsev G., Vladyko A. VANET Ver. 2.0.0 – Software Module for Modeling the Interaction of Edge Devices, 2024. URL: <https://github.com/quanuhs/VANET> (accessed 11.09.2025).
- [18] Tambovtsev G.I., Plotnikov P.V., Vladyko A.G. "Load balance software module on V2X system objects". Patent RF, no. 2025664933, 09.06.2025. (in Russ.)
- [19] Tambovtsev G., Plotnikov P., Vladyko A. SimV2X – Software Module for Modeling the Interaction of Edge and Fog Devices, 2025. URL: <https://github.com/quanuhs/simV2X> (accessed 01.11.2025).
- [20] Tambovtsev G.I., Plotnikov P.V., Vladyko A.G. "V2X Simulation Software Module (simV2X)". Patent RF, no. 2025689008, 23.10.2025. (in Russ.)
- [21] A. Vladyko, P. Plotnikov, G. Tambovtsev, "Simulation-Based Evaluation of V2X System with Variable Computational Infrastructure," *Network*, 2025, vol. 5, pp. 4, doi: 10.3390/network5010004.
- [22] P. V. Plotnikov, G. I. Tambovtsev and A. G. Vladyko, "The Balance Model for V2X System with Variable Infrastructure," *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948102.
- [23] P. V. Plotnikov, G. I. Tambovtsev, A. G. Vladyko, "Performance Evaluation of V2X Model with a Mobile Road Side Units," *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332617.

**Information about authors:**

**Pavel V. Plotnikov**, SPbSUT, Head of Department of Higher Mathematics, St. Petersburg, Russia, ORCID 0000-0001-8869-6142

**Gleb I. Tambovtsev**, SPbSUT, graduate student, Engineer of the Student Design Bureau, St. Petersburg, Russia, ORCID 0009-0006-8034-0516

**Andrei G. Vladyko**, SPbSUT, Dean of Faculty of Radioelectronic Systems and Robotics, St. Petersburg, Russia, ORCID 0000-0002-8852-5607

# OBSTACLE DENSITY ESTIMATION ACCORDING FROM THE RADAR CHANNEL MEASUREMENTS TO THE TECHNICAL VISION SYSTEM OF GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEX

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-55-64

**Danil N. Bezumnov,**  
Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [d.n.bezumnov@mtuci.ru](mailto:d.n.bezumnov@mtuci.ru)

**Manuscript received** 02 December 2025;  
**Accepted** 10 February 2026

**Denis S. Chirov,**  
Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [d.s.chirov@mtuci.ru](mailto:d.s.chirov@mtuci.ru)

**Keywords:** robotic complex, technical vision system, radar measurements, information processing, object recognition

One of the main trends in the development of robotics is the increasing autonomy and intellectualization of robotic complexes. The main source of data for decision-making and implementation of certain actions by the ground-based robotic complex (GBRC) is the technical vision system (TVS). Therefore, improving the TVS and data processing algorithms is an important task. The article presents the results of research on estimating the density of an obstacle based on measurements of the radar channel of the TVS of the GBRC. This task is relevant when the GBRC builds its route autonomously, i.e., when the GBRC builds its route from point A to point B and adjusts it if obstacles are detected. It is obvious that if the GBRC is used in a rural area, the optical channel will perceive tall grass as an obstacle and start rearranging the route, which may result in a longer path or, ultimately, the GBRC not completing its task. An analysis of existing studies has shown that it is possible to estimate the density of an obstacle using measurements from a mm-range radar system (RS). The results of evaluating the possibility of determining the density of obstacles using the radar channel of the onboard TVS of the GBRC using a simulation model of the radar channel showed that the density of obstacles can be estimated based on the normalized radar cross-section (RCS) of various obstacles. The normalized RCS of obstacles is determined with the least errors at short distances (about 10-15 m). Certain types of obstacles (trees, shrubs, and tall grass) can be further selected based on the correlation time of the received signal, which is significantly lower than that of homogeneous solid obstacles (wooden or concrete walls, and cars). The principle of using normalized RCS and signal correlation time depends on the type of classifier (artificial neural network, decision tree, etc.). Further research by the authors will focus on the specific implementation of this algorithm.

## Information about authors:

**Danil N. Bezumnov,** Moscow Technical University of Communications and Informatics, senior lecturer, Moscow, Russia

**Denis S. Chirov,** Moscow Technical University of Communications and Informatics, head of department, doctor of technical sciences, professor, Moscow, Russia

## Для цитирования:

Безумнов Д.Н., Чирова Д.С. Оценка плотности препятствия по измерениям радиолокационного канала системы технического зрения наземного робототехнического комплекса // Т-Комм: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 55-64.

## For citation:

D.N. Bezumnov, D.S. Chirov, "Obstacle density estimation according from the radar channel measurements to the technical vision system of ground-based robotic complex," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no. 2, pp. 55-64.

## Introduction

Modern technical vision systems (TVS) for ground-based robotic complex (GBRC) are complex systems with a variety of multi-range sensors [1, 2]. Optical, infrared, and radar sensors are the most commonly used sensors in TVS [3]. Each measurement channel has its own advantages and disadvantages [4]. For example, an optical channel, which usually consists of several video cameras, can provide high-detail images in real time. However, passive optical sensors can only work in conditions of sufficient illumination, i.e., during the day and in the absence of interfering weather phenomena (fog, rain, etc.). The infrared channel (thermal imager) allows us to receive images of our surroundings at night, but the image quality and range will be much lower than those of an optical imager. It is the specific features and limitations of various sensors that have led to the fact that the TVS of the GBRC is a complex of multi-range sensors that are combined into a single system through the integrated processing of multi-range data [5, 6].

A large number of papers have been devoted to the problem of selecting an optimal (rational) set of sensors [7-9]. These studies have shown that in addition to sensors for obtaining visual information (images), the TVS of the GBRC should include devices for measuring the parameters of the observed objects: range, speed, etc. One of the interesting properties of observed objects is their density. This property is especially relevant for GBRC when they are building a route autonomously, i.e., when the GBRC builds a route from point A to point B and adjusts it if obstacles are detected. Obviously, if the GBRC is used in a rural area, the optical channel will perceive tall grass as an obstacle, and the GBRC will start rearranging the route. Obtaining radar or infrared images will not solve the problem either. Recognizing grass from images won't provide the desired result either, as there's no guarantee that there isn't a large rock or a fallen tree in the grass that the TVS doesn't currently see.

The solution to this problem is to measure the density of the obstacle, which will allow the GBRC's onboard algorithm to make a rational decision about the route. The density of the obstacle can be measured using a special radar channel in the TVS of the GBRC.

### 1 Analysis research in the subject area

As mentioned above, the TVS's channels, including radar channels, are used not only to solve classical problems of determining the range and geometric parameters of environmental objects, but also to determine such characteristics as their density [10, 11], type of material [12-17], structure [18-21], electrical conductivity [22], and volume [13, 15]. At the same time, radar data can both complement optical channel data and be used independently.

Paper [10] proposes an approach to estimating forest cover density based on the combination of optical and radar satellite data. 411 parameters were extracted from sub-meter optical satellite images, synthetic aperture radar satellite images, and digital elevation model data, and 17 of them were selected to build an estimated model of vegetation density. Three different models have been developed: multiple stepwise regression; neural network; and decision tree-based. As a result, the accuracy of density estimation increases from 76.50% for optical images and 78.50% for radar images to 78.66% for both options. The neural network-

based model achieved the highest overall accuracy (79.19%) and demonstrated excellent accuracy in estimating low tree cover density (75.37%), while the decision tree-based model using radar image features showed excellent accuracy in estimating medium density (87.46%). It is noteworthy that the integrated decision tree-based cubic model, which combines optical and radar data, achieved the highest accuracy in estimating high vegetation cover density (89.17%).

In [11], the possibility of detecting a human body dummy by changes in the acoustic field caused by various boundary conditions in the low and moderately low frequency ranges is investigated.

Paper [12] presents the results of modeling the transmission of infrasonic energy in the range from 3 to 5 Hz through various types of fabrics (cotton, linen, wool, and nylon) with different wave propagation properties. Depending on the refractive index, these materials have different acoustic transparency, which in turn affects the reflected acoustic power.

A large number of modern vision systems use millimeter-wave radars. These systems are used to solve a wide variety of tasks: determining the level of liquids in various tanks, calculating the volume occupied by solid materials, assessing the surface in industry, measuring and monitoring vibration [13].

A number of papers consider the use of millimeter wave radars for monitoring a variety of materials, as well as objects, without their direct destruction, i.e. without penetration. For example, [13] presents a scheme for identifying various materials, and this scheme also contains a radar operating in the millimeter wave range. Identification of materials is performed using a set of specific machine learning methods. Reflected radar signature is used for machine learning. To solve this problem, the scheme uses three approaches: convolutional neural networks (CNN), the k-nearest neighbor method, and the dynamic time distortion (DTW) method. The authors managed to achieve almost 100% accuracy for the classification of six types of materials. The paper also contains the results of a study on whether it is possible to calculate the volume of material classified a step earlier. The research is conducted for three different levels. The results showed a classification with 98% accuracy.

In [14], the use of synthetic aperture radar (SAR) is investigated, a technology often used to solve problems of this class. Based on the information from the SAR, the intensity of yield in each single pixel of the image is identified. At the first stage, synthetic radar data is calculated. For this purpose, the parameters that are characteristic of a broadband radar are used if it operates in searchlight mode and illuminates several scattering regions, and these regions differ in frequency characteristics. At the second stage, the data set is divided into frequency sub-ranges, and the variance is calculated for each pixel. Finally, at the final stage, an elementary classification analysis makes it possible to identify the yield intensity.

Wireless classification of various materials is demonstrated in [15]. For this purpose, a broadband CMOS receiver operating in the millimeter range is used in the work. The experiment is arranged as follows: power is transmitted through several solid materials at different distances from the receiver, then it is recorded by the receiver in the W-band, which corresponds to frequencies in the range of 75-110 GHz. Based on the obtained data, materials are classified into various categories using machine learning methods. Trained classifiers were used to predict the values of the type

of material and its thickness. As a result, the classification accuracy was 96% for the type of material and 88% for the thickness.

The material identification system is described in [16]. This system uses a portable 3D imaging radar system. In this system, a 3D brightness map of an object is sent to the CNN input, and at the output, the authors receive an assumption about the class of the object's material. The authors proved that this approach gives better results than using raw data coming from antennas.

In [17], the problem of classifying materials in a set of different plates using a Siamese network is solved. This network uses a similarity metric that is directly related to the distance to the object under study. This indicator takes small values for identical materials. If the objects are made of different materials, then the value of the similarity indicator also increases. The results were tested in the classification of four different materials, using a short-range radar operating at a frequency of 60 GHz. The classification accuracy was more than 99%.

In [18], the application of X-ray diffraction analysis to determine the characteristics of materials with a crystal lattice is considered. The following characteristics are investigated: structure, phase, texture, average grain size, crystallinity, deformation, crystal defects. The paper contains a comparative analysis of the latest scientific developments in such industries as pharmaceutical and glass industry, flaw detection, forensic examination, electronics and geology.

Paper [19] presents an imaging method that uses coherent scattered or diffracted X-rays to identify potentially harmful or prohibited building materials.

Paper [20] describes the basic physical interaction of electromagnetic waves in the range of wavelengths from decimeters to millimeters (in a vacuum, frequencies from 300 MHz to 300 GHz) with various objects hidden behind dielectric materials (paper, wood, ceramics, concrete, polymer materials, and fiber composites) for their detection and evaluation of various characteristics. Practical examples of determining the moisture content of porous materials and controlling the process of injection molding of polymers are provided. Special attention is paid to visualizing objects hidden under clothing that need to be detected with maximum speed and accuracy, such as weapons and explosives.

Paper [21] discusses the use of artificial neural networks and machine learning to interpret ground-based radar data, taking into account knowledge about the propagation of electromagnetic waves, material properties, and antenna theory. Paper [22] explores the use of passive RFID tags to determine the dielectric constant of a test material.

Thus, a review of methods for assessing the density of materials shows that the mm-range radar channel of the TVS of the GBRC can be used to solve this problem [23]. In order to assess this possibility and evaluate the numerical characteristics, the authors conducted mathematical modeling.

## 2. Mathematical model of the radar channel of the TVS of the GBRC

Almost all modern on-board radar systems of the TVS of the GBRC use complex broadband probing signals that provide high resolution in range and angular coordinate (Doppler frequency). Taking into account modern means of digital signal generation and processing, pulsed signals with intra-pulse linear frequency modulation (IFM) and signals with direct spectrum expansion are the

most preferable for radar tasks. In our case, we will limit ourselves to signals with direct spectrum expansion.

Let's consider the mathematical description of the GBRC radar channel. It contains, firstly, a description of the surface to be located, secondly, the ways in which the probing signal interacts with the surface to be located, and thirdly, a description of the reflected signal. The interaction of the probing signal with the reflecting surface is the main component, because depending on this, both the reflecting surface itself and the initial data used to describe the signal after reflection are described.

Let's apply a certain approach that describes the GBRC radar channel from a mathematical point of view. There is a concept of an independent reflector in this approach. Then the reflecting surface is represented as a set of independent reflectors. When using this approach, the output signal of the system will be a superposition of elementary reflected signals [24]. When using this description, the channel is defined by the scattering function. This function represents the average power distribution of the reflected signal, described in a special coordinate system from the delay and from the Doppler frequency shift.

When modeling a useful signal in the multi-position radar system of the TVS of the GBRC, used to detect obstacles, the main thing is the stage of forming the input radio signals in each receiver from the probing radio signals of all transmitters. This will allow us to take into account important properties of the model. It should also take into account the propagation of signals on the highway, their scattering on obstacles of various types, primarily targets, as well as passive interference and reflection from the underlying surface [24, 28-31].

In such tasks, solutions in a general matrix form for a system consisting of  $M$  transmitters and  $N$  receivers have proven themselves well. In a specific case, these systems can work for both reception and transmission, so the coordinates of the individual transmitters and receivers will match.

Thus, a linear system with  $M$  inputs and  $N$  outputs is formed, whose signal transmission can be described by an  $M \times N$  transfer function matrix  $K(\tau, t)$ . In this case, the output signal vector  $S(t)$  is described by the time-domain convolution of the input (emitted) signal vector  $X(t)$  and the transfer matrix  $K(\tau, t)$ :

$$S(t) = \int_0^{t_{\max}} K(\tau, t) X(t - \tau) d\tau,$$

where  $t_{\max}$  – maximum duration of transmission characteristics.

Let's take the following for granted: the input signals of the system are samples from the output of the probing generator, which are taken with a certain modeling step  $\Delta t = t_j - t_{j-i}$ . At the same time, the receiver input responses are calculated in increments that do not contradict Kotelnikov's criterion for the simulation bandwidth. This term refers to a band that is unifying for all the bands that are occupied by the emitted signals.

Let's define the matrix of transfer characteristics in discrete form:

$$K = X_A \cdot K_{ir} \cdot G_m \cdot F_{PTm}(\alpha, \beta) \cdot L_{ak} \cdot \Delta f_{prm},$$

where  $n$  – index of receiving modules;  $m$  – index of transmitting modules;  $k$  – index of propagation paths taken into account during

modeling;  $X_A = \frac{G_n F_{PTn}(\alpha, \beta)}{\Delta f_{prm}}$ ;  $G_m$  – gain of the transmitting

antenna of the  $m$ -th transmitter;  $F_{PTm}(\alpha, \beta)$  – normalized radiation pattern of the  $m$ -th transmitter's transmitting antenna;  $\Delta f_{prm}$  – bandwidth of the  $m$ -th transmitting module's probe signal;  $G_n$  – gain of the receiving antenna of the  $n$ -th receiver;  $L_{ak}$  – losses due to signal propagation in the atmosphere;  $F_{PTn}(\alpha, \beta)$  – normalized radiation pattern of the  $n$ -th receiver's receiving antenna;  $\Delta f_{prn}$  – center frequency of the  $n$ -th receiving module bandwidth;  $K_{tr}$  – matrix of propagation coefficients of radio signals from the  $m$ -th transmitter to the  $n$ -th receiver input.

The following types of paths must necessarily be taken into account at the stage of constructing the distribution coefficient matrix:

1) Direct transmission of the transmitter's radio signal to the receiver's input, then

$$K_{tr} = \frac{1}{R} e^{-jk_m R},$$

where  $R$  – the distance between two objects (in this case, between the transmitter and the receiver),

$$R = \sqrt{(X_{txm}(t_i) - X_{rxn}(t_i))^2 + (Y_{txm}(t_i) - Y_{rxn}(t_i))^2 + (Z_{txm}(t_i) - Z_{rxn}(t_i))^2},$$

where  $X_{txm}$ ,  $Y_{txm}$ ,  $Z_{txm}$  – coordinates of the  $m$ -th transmitting module at the current time;  $X_{rxn}$ ,  $Y_{rxn}$ ,  $Z_{rxn}$  – coordinates of the  $n$ -th receiving module at the current time;  $k$  – propagation constant of the  $m$ -th transmitter.

2) angle-time reflection of a radio signal from an object (target)

$$K_{tr} = \frac{1}{R_{txm-c}} e^{-jk_m R_{txm-c} \sigma_c},$$

where  $i$  – the index for the targets;  $R_{txm-c}$  – distance between the transmitter and the  $i$ -th target;  $\sigma_c$  – target RCS value depending on the irradiation angle.

3) Radio signal scattering by the underlying surface.

Consider the signal emitted by the transmitting device and scattered by the underlying surface. Obviously, this signal has a strong influence on the response that is received at the receiver input. This signal is the sum of the signals that have been reflected from each elementary area of the surface. The surface sections here mean a rectangular facet, but it can also be a triangular facet and an edge. This circumstance significantly complicates calculations, as it increases the amount of calculations. The set of multiple point reflectors will be a model of the underlying surface. Let's assume that they (reflectors) are randomly distributed over the surface. Since the reflection is almost specular, the reflectors in the model are located at different heights.

A commonly used law for the distribution of reflectors in height is the normal distribution. The mathematical expectation in this case will be zero. The variance will correspond to the standard deviation of the surface heights  $\sigma_s$ :

$$w(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{h^2}{2\sigma_c^2}}.$$

The phase distribution of elementary reflectors is uniform over the  $t$  interval, and the RCS distribution occurs according to Rayleigh's law:

$$w(h) = \frac{\sigma_z}{\sigma_0^2} e^{-\frac{\sigma_z}{\sigma_0^2}},$$

where  $\sigma_0 = \frac{\sigma_{rs}}{\rho}$ ;  $\sigma_{rs}$  – normalized RCS of the reflecting surface;

$\rho$  – density of point reflectors.

Both the complication and simplification of the model occurs by changing the density of the distribution of reflectors. It depends on what is more important for the researcher: to obtain the required accuracy or to achieve the specified speed of calculations. If you change the law of the distribution of reflectors in height, or change the parameters of this distribution law, you can get models with different reflective surfaces.

Background reflecting surfaces (RS) will be called statistically homogeneous areal formations of both natural and anthropogenic origin. The area of the RS should be significantly larger than the area of the radar resolution element  $S_r$  and local anthropogenic objects (AO) located on their background.

The reflection characteristics of RS as areal formations are described by the normalized RCS,

$$\sigma_0 = 4\pi D^2 \frac{I_{refl}}{I_{tx} S_r},$$

where  $D$  – the distance from the radar of the GBRC to the object;  $I_{tx}$  – the intensity of the emitted (incident) wave at a unit distance from the emitter;  $I_{refl}$  – the intensity of the reflected wave at a given viewing angle at a unit distance from the object;  $S_r$  – the area of the radar resolution element (RE) on the ground.

In turn, the intensity of the reflected signal can be represented as follows:

$$I_{refl} = I_{refl.bas.} + I_{refl.misc.}$$

where  $I_{refl.bas.}$  – the main polarization component, in which reception and radiation are carried out on the same type of linear polarization: vertical or horizontal.

Then the propagation coefficient of the radio signal will be defined as

$$K_{tr} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{d_{txm-zi} d_{zi-rxn}} e^{-jk_m (d_{txm-zi} + d_{zi-rxn}) - \sigma_z(\varphi_1, \varphi_2)},$$

where  $N$  – the number of diffusers on a given surface area;  $d_{txm-zi}$  – the distance between the transmitter and the  $i$ -th reflector of the underlying surface;  $d_{zi-rxn}$  – the distance between the  $i$ -th reflector of the underlying surface and the receiver;  $\sigma_z(\varphi_1, \varphi_2)$  – the value of the RCS of the  $i$ -th reflector when it is irradiated at an angle of  $\varphi_1$  and the signal is received at an angle of  $\varphi_2$ :

$\sigma_z(\varphi_1, \varphi_2) = \sqrt{|\sigma_z(\varphi_1)| |\sigma_z(\varphi_2)|}$ , where  $\sigma_z(\varphi)$  – the value of monostatic RCS depending on the irradiation angle.

4) Re-reflection of the radio signal first from the reflecting surface, and then from the target

$$K_{tr} = \frac{1}{d_{txm-zt} d_{z-c} d_{c-rxn}} e^{-jk_m(d_{txm-zt} + d_{z-c} + d_{c-rxn})\Gamma(\varphi)},$$

where  $\Gamma(\varphi)$  – reflection coefficient from the RS.

5) Re-reflection of the radio signal first from the target and then from the RS:

$$K_{tr} = \frac{1}{d_{txm-ci} d_{c-z} d_{z-rxn}} e^{-jk_m(d_{txm-ci} + d_{c-z} + d_{z-rxn})\Gamma(\varphi)}.$$

Obviously, other types of trails not discussed above will not have a significant effect on the reflected signal, therefore, within the framework of the model under consideration, we can neglect them.

The total number of propagation paths for each  $n$ -th receiving and  $m$ -th transmitting module is defined as

$$K = 2 + 3N.$$

Thus, taking into account the combinations of all receiving modules, propagation paths, transmitting modules and targets, a three-dimensional matrix of propagation coefficients  $K_{trM \times N}$  is obtained, where  $N$  – total number of receiving modules,  $M$  – total number of transmission modules,  $K$  – total number of paths.

Taking into account all of the above, the final expression for the radio signal samples at the input of the  $n$ -th receiving module is as follows:

$$S_n(t_j) = \sum_{i=0}^{K-1} K_{tr}(t_j) \cdot X_n(t_j - \tau_k) \cdot (\tau_k - \tau_{k-i}),$$

where  $t_j$  – the time point at which the receiver input signal is calculated,  $\tau_k$  – simulation time.

#### Assessment of the possibility of determining the density of obstacles by the radar channel of the on-board TVS of the GBRC

The above-described simulation model of the radar channel of the on-board TVS of the GBRC was developed in the Matlab mathematical programming environment and includes: an obstacle detection channel (a spatially distributed object) and a channel for measuring (evaluating) the received signal power.

The initial data for the model of the radar channel of the TVS of the GBRC for assessing the density of obstacles were:

- typical obstacles and their dielectric characteristics [25];
  - the size of the obstacle;
  - distance to the obstacle;
  - radar channel parameters of the on-board TVS of the GBRC.
- The parameters of the radar channel of the on-board TVS of the GBRC during the assessment were:
- transmitting device power –  $P_{tx} = 1$  W;
  - operating frequency of the probe signal  $f_0 = 77$  GHz;
  - polarization of the probing signal – vertical;

- the probing signal is pulsed, modulated by a 63rd element Gold sequence;

- the width of the signal spectrum  $\Pi_s = 1$  GHz;

- pulse duration  $T_i = 6.3$  ns;

- pulse sending frequency  $F_s = 10$  kHz;

- width of the antenna system's radiation pattern in the azimuthal plane  $\Delta\beta = 0.5^\circ$ ;

- width of the antenna system's radiation pattern in the angular plane  $\Delta\varepsilon = 0.5^\circ$ ;

- the type of space survey – consistent in azimuth and angle of location;

- antenna pattern scanning sector is  $\pm 30^\circ$  by azimuth and  $0-30^\circ$  by location angle;

- height of the antenna system phase center – 1.5 m;

- noise factor of the receiving device – 3.

Studies to assess the possibility of determining the density of obstacles are carried out in the following sequence:

1) The operator downloads a simulation model of the radar channel of the TVS of the GBRC in the Matlab simulation environment;

2) the operator enters the initial data for the experiment (simulation), which includes:

- the type of obstacle, its size and dielectric characteristics;
- the required distance to the obstacle  $R_{ref}$ , at which it should be detected with a given probability and the density of obstacles estimated;
- the required probability of detecting an obstacle  $P_{det}$  and the probability of a false alarm  $P_{fa}$ ;
- power of the transmitting device  $P_{tx}$ ;
- the operating frequency of the probe signal  $f_0$ ;
- polarization of the probe signal;
- probe signal type and modulation parameters;
- the width of the signal spectrum  $\Pi_s$ ;
- duration of the signal  $T_s$ ;
- the width of the radiation pattern of the transmitting and receiving antenna in the azimuthal ( $\Delta\beta$ ) and angular planes ( $\Delta\varepsilon$ );

- height of the antenna phase center;

- signal polarization;

- the upper limit of the range measurement error  $\sigma_R$ ;

3) the operator starts the process of simulating the functioning of the radar channel of the TVS of the GBRC in order to determine the density of obstacles;

4) по окончании моделирования оператор фиксирует выходные параметры модели радиолокационного канала of the TVS of the GBRC:

- radar portrait of an obstacle (spatially distributed object), as a function of the dependence of the received signal power normalized to the receiver noise level by resolution elements;

- the normalized RCS of the obstacle (spatially distributed object)  $\sigma_0$  in each element of the resolution;
- the width of the spectrum of fluctuations of the received signal  $\Delta F_{fl}$  and the correlation interval of the signal  $\tau_{cor}$  in each element of the resolution;
- polarization characteristics of the received signal.

The normalized RCS of an obstacle in each element of the resolution  $\sigma_0$  is calculated using a reference object with a known RCS and located at a known range using the formula:

$$\sigma_0 = \frac{P_{rx} \hat{R}_{meas}^2 \sigma_{ref} \cos \theta}{P_{ref} R_{ref}^4 \Delta R \Delta \beta \Delta \varepsilon},$$

where  $P_{rx}$  – the power of the signal received from the obstacle;  $\hat{R}_{meas}$  – the measured distance to the obstacle;  $\sigma_{ref}$  – RCS of the reference object;  $R_{ref}$  – distance to the reference object;  $P_{ref}$  – signal power from the reference object;  $\Delta R$  – range resolution;  $\theta$  – obstacle exposure angle;  $\Delta \beta$  – azimuth resolution;  $\Delta \varepsilon$  – location angle resolution.

For each resolution element, the signal correlation interval is additionally calculated based on the results of receiving a sequence of echo signals during modeling  $\tau_{cor}$ . The correlation interval  $\tau_{cor}$  is an additional information parameter when assessing the type of obstacles by the radar channel of the TVS of the GBRC.

The simulation was performed at several frequencies using vertical and horizontal polarization of the signal.

The determination of the density (type) of an obstacle is carried out by comparing the simulation results obtained for determining the normalized RCS of obstacles with the data given in the reference literature on the normalized RCS of materials of different densities at appropriate frequencies and signal polarization [25].

For extended obstacles (spatially distributed objects), a radar portrait of the obstacle is formed, representing a  $N_\beta \times N_\varepsilon$  matrix (where  $N_\beta$ ,  $N_\varepsilon$  – the number of azimuth and location angle resolution elements, respectively), whose elements are the values of the received signal power normalized to the noise level of the receiving device.

The calculated values of the normalized RCS of the obstacle obtained as a result of experimental studies, the correlation time of the signal at the frequency  $f_0$  (at a wind speed of 1 m/s) and the specified signal polarization are summarized in Table 1.

The results shown in Table 1 of the assessment of the possibility of determining the density of obstacles by the radar channel of the on-board TVS of the GBRC using a simulation model of the radar channel showed that the density of obstacles can be estimated by the normalized RCS of various obstacles. The normalized RCS of obstacles is determined with the least errors at short ranges (about 10-15 m). This is due to the fact that with a narrow antenna pattern at a short range, the signal is reflected from a small area of homogeneous material. As the range increases for non-uniform obstacles (such as a tree, shrub, tall grass), the density determination error increases.

Table 1

The results of the assessment of the possibilities of determining the density of obstacles by the radar channel of the on-board TVS of the GBRC

Type of obstacle/ Distance		Normalized RCS $\sigma_0$		Signal correlation time, s
		Reference [25]	Average calculated	
Dry tree	10 m	0.19	0.196	>10
	50 m	0.19	0.2	>10
Tree (separate)	10 m	0.33	0.24	0.7
	50 m	0.33	0.21	0.7
Shrub	10 m	0.17	0.18	0.051
	30 m	0.17	0.14	0.17
Grass	10 m	0.10	0.13	0.035
	30 m	0.17	0.12	0.12
Wall (concrete)	10 m	0.31	0.29	>10
	50 m	0.31	0.28	>10

This is determined by the fact that at long range, the geometric dimensions and the cross-sectional area of the beam increase, and the size of the resolution element increases accordingly. Within the beam, the reflecting surface becomes more heterogeneous due to the illumination of elements with different normalized RCS (for example, the trunk of a tree and the leaves of a crown).

As the simulation results have shown, certain types of obstacles (trees, shrubs, tall grass) can be additionally detected by the correlation time of the received signal, which is significantly lower than for homogeneous solid obstacles.

During the simulation, radar portraits of heterogeneous obstacles, such as a single tree, shrub, and tall grass, were obtained at ranges of 10-50 m. The radar portrait of an obstacle represents the dependence of the received signal power on the angular coordinates of the antenna pattern during a sequential survey of space. The more powerful signal in the drawing corresponds to the lighter color of the palette. The radar portraits of radar-contrasting objects (obstacles) obtained during the simulation are shown in Figures 1-5.

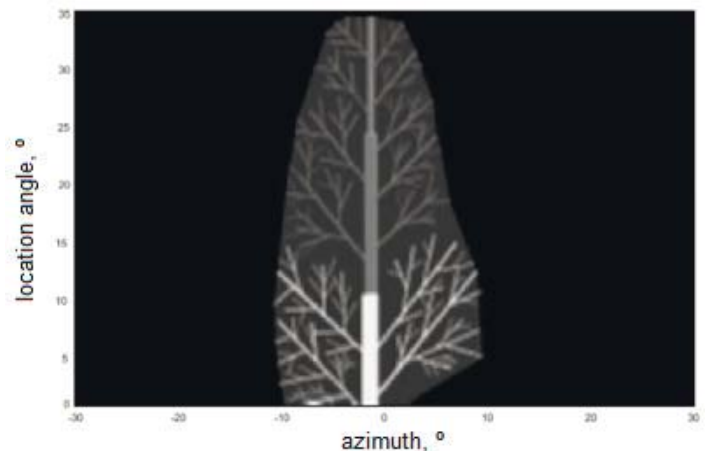


Figure 1. Radar portrait of a single tree (model) at a distance of 10 m

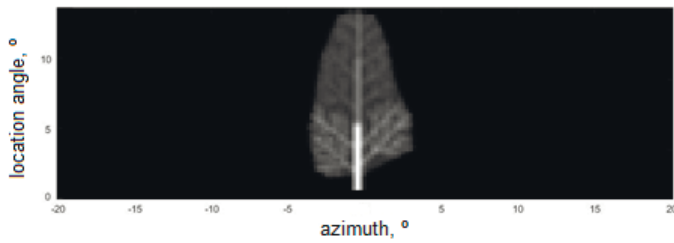


Figure 2. Radar portrait of a single tree (model) at a distance of 30 m

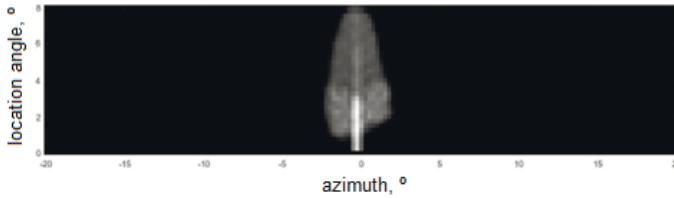


Figure 3. Radar portrait of a single tree (model) at a distance of 50 m

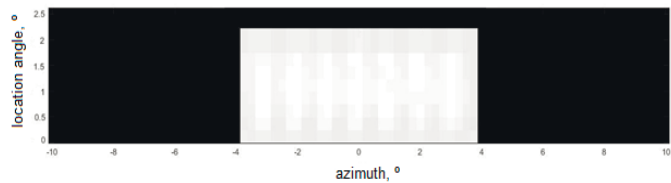


Figure 4. Radar portrait of an area with a shrub 3.9 m wide and 1.0 m high (model) at a distance of 10 m

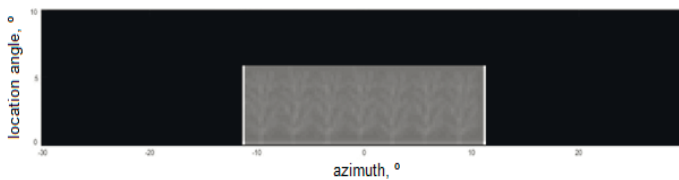


Figure 5. Radar portrait of an area with a shrub 3.9 m wide and 1.0 m high (model) at a distance of 30 m

Thus, the estimation of the obstacle density can be used as additional information in the TVS of the GBRC object recognition algorithm based on the well-proven Shortliffe scheme [26, 27]:

$$P_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(A_i)),$$

where:  $N$  – number of measuring channels,  $A_i$  – information from the  $i$ -th channel,  $P(A_i)$  – the probability of correct object recognition based on  $A_i$ . The algorithm diagram is shown in Figure 6.

In this scheme, information about the normalized RCS  $\sigma_0$  and the signal correlation time  $\tau_{cor}$  is used as additional features in the classification (recognition) of objects by radar measurements. The principle of using this information depends on the type of classifier (artificial neural network, decision tree, etc.). Further research by the authors will be devoted to the specific implementation of this algorithm.

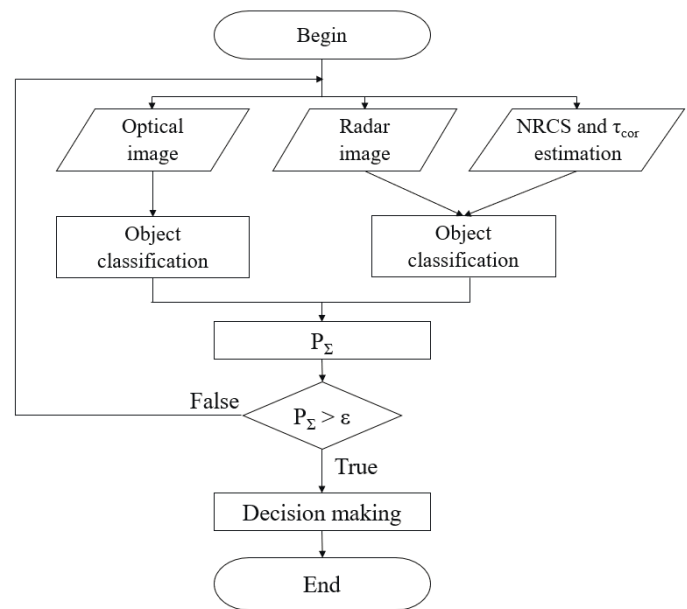


Figure 6. The scheme of the object recognition algorithm based on the Shortliffe scheme

## Conclusion

The results of evaluating the possibility of determining the density of obstacles using the radar channel of the onboard TVS of the GBRC using a simulation model of the radar channel showed that the density of obstacles can be estimated based on the normalized RCS of various obstacles. The normalized RCS of obstacles is determined with the least errors at short distances (about 10-15 m).

Certain types of obstacles (trees, shrubs, and tall grass) can be further selected based on the correlation time of the received signal, which is significantly lower than that of homogeneous solid obstacles (wooden or concrete walls, and cars). During the simulation, radar portraits of heterogeneous obstacles, such as individual trees, shrubs, tall grass, and cars, were obtained at ranges of 10-50 m.

The results of evaluating radar portraits of radar-contrasting objects (obstacles) show that, with a high angular resolution of the radar channel, they can be classified using appropriate image recognition methods.

## References

- [1] I.S. Konstantinov and V.A. Gaivoronsky, "Formation of Area Data by Multi-Camera Video Systems", *Economics. Computer Science*, 2022, No. 49(4), pp. 863–870, DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-4-863-870 (in Russian).
- [2] D.N. Bezumnov, D.S. Chirov and M.V. Bazylev, "Object classification algorithm based on complex data processing of the technical vision system of a ground-based robotic complex", *Telecommunications*, 2025, No. 2, pp. 40-45, DOI: 10.34832/ELSV.2025.64.2.006 (in Russian).
- [3] P. Singh, S. Menkudale, S. Soni, V. Tank and A. Raj, "Comprehensive Survey on Radar Systems and Its Target Classification Techniques", *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 2025, No. 1, pp. 234-269, DOI: 10.37256/jee.4120255934.

- [4] P.V. Stepanov and D.S. Chirov, "Methods for identifying radio emission sources in an expert system for analyzing radio monitoring data", *Issues of business control and financial audit, national security, system analysis, and management, Materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference*, Moscow, Expert and Analytical Center, 2022, pp. 557-562 (in Russian).
- [5] A.V. Nikonenko, D.S. Chirov and A.A. Kuchumov, "Appearance of a multi-beam radar system for detecting small air targets", *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering*, 2023, No. 1, pp. 39-43, DOI: 10.34832/NIIR.2023.12.1.005 (in Russian).
- [6] D.N. Bezumnov, D.S. Chirov and O.V. Korenkov, "Method of information integration in technical vision systems of ground-based robotic systems", *Issues of business control and financial audit, national security, system analysis, and management, Collection of Materials of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference*, Moscow, Expert and Analytical Center, 2024, pp. 460-467 (in Russian).
- [7] A.M. Ageev, V.G. Bondarev and V.V. Protsenko, "Justification of the choice of radiation sources for a computer vision system in the problem of automatic landing of unmanned aerial vehicles", *Computer Optics*, 2022, No. 46(2), pp. 239-245, DOI: 10.18287/2412-6179-CO-875 (in Russian).
- [8] D.S. Chirov, O.G. Chertova and T.N. Potapchuk, "Methodology for justifying requirements for the technical vision system of a robotic complex", *Proceedings of SPIIRAS*, 2017, No. 2 (51), pp. 152-176, DOI: 10.15622/sp.51.7. (in Russian).
- [9] S.P. Khripunov and D.S. Chirov, "A methodological approach to justifying the feasibility of using intelligent information technologies in the synthesis of management models for complex organizational and technical systems", *Information, Measurement and Control Systems*, 2016, vol. 14, No. 1, pp. 39-47. (in Russian).
- [10] Y. Wang, X. Li, X. Yang, W. Qi, D. Zhang and J. Wang, "Estimation of Picea Schrenkiana Canopy Density at Sub-Compartment Scale by Integration of Optical and Radar Satellite Images", *Forests*, 2024, No. 15, p. 1145, DOI: 10.3390/f15071145.
- [11] D. Bibicu, A. Culea, S. Moldovanu and L. Moraru, "2D multiple waves scattering for active detection of a dummy human body in a low frequency range and for various boundary conditions", *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, No. 2701, p. 012012, DOI: 10.1088/1742-6596/2701/1/012012.
- [12] D. Bibicu, S. Moldovanu and L. Moraru, "Numerical evaluation of low frequency sound propagation in two layered media", *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, No. 1391, p. 012032, DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012032.
- [13] S. Skaria, N. Hendy and A. Al-Hourani, "Machine Learning Methods for Material Identification Using mmWave Radar Sensor", *IEEE Sensors Journal*, 2022, pp. 1-1, DOI: 10.1109/JSEN.2022.3227207.
- [14] C. He, J. Song and H. Xu, "Optical and SAR Data Fusion Based on Transformer for Rice Identification: A Comparative Analysis from Early to Late Integration", *Agriculture*, 2025, No. 15, p. 706, DOI: 10.3390/agriculture15070706.
- [15] B. Jamali, D. Ramalingam and A. Babakhani, "Intelligent Material Classification and Identification Using a Broadband Millimeter-Wave Frequency Comb Receiver", *IEEE Sensors Letters*, 2020, pp. 1-1, DOI: 10.1109/LSENS.2020.3002715.
- [16] C. Bhattacharya, J. Singh, D. Sahu, V. Mor, A. Kumar and S. Ravindra, "Real-Time product quality assurance management Using Vision sensor and Convolutional Neural Networks", *International Conference on Data Processing and Networking (ICDPN-2024)*, 2025, DOI: 10.1007/978-981-96-3102-5\_21.
- [17] J. Weiß and A. Santra, "One-Shot Learning for Robust Material Classification Using Millimeter-Wave Radar System", *IEEE Sensors Letters*, 2018, pp. 1-1, DOI: 10.1109/LSENS.2018.2878041.
- [18] A. Soumya, K.M. Chalavadi and L.R. Cenkeramaddi, "Recent Advances in mmWave-Radar-Based Sensing, Its Applications, and Machine Learning Techniques: A Review", *Sensors*, 2023, p. 23, DOI: 10.3390/s23218901.
- [19] J. Chan, P. Evans, X. Wang, S. Godber, I. Peatfield, K. Rogers, J. Rogers and A. Dicken, "Scatter enhanced 3D X-ray imaging for materials identification", *Proceedings – International Carnahan Conference on Security Technology*, 2010, pp. 142-147, DOI: 10.1109/CCST.2010.5678684.
- [20] G. Dobmann, I. Altpeter, C. Sklarczyk and R. Pinchuk, "Non-destructive testing with micro- and Mm-waves – where we are – where we go", *Fraunhofer IZFP*, 2013, No. 56, DOI: 10.1007/BF03321153.
- [21] M. Shehab, M. Alkaltakchi, A. Dukhan and W.L. Woo, "Enhancing Ground Penetrating Radar (GPR) Data Analysis Utilizing Machine Learning", *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 2025, No. 29, pp. 321-330, DOI: 10.31272/jesd.2509.
- [22] L. Lasantha, B. Ray, H. Masoumi and N. Karmakar, "Cross-Polarised Chipless RFID Sensor: A Novel Approach for Measuring Dielectric Constants in Solid Minerals and Rocks", *IEEE Sensors Journal*, 2025, pp. 1-1, DOI: 10.1109/JSEN.2025.3565761.
- [23] K. Shi, Z. Shi, A. Chen, Z. Xiong, J. Chen and J. Luo, "Radar and Camera Fusion for Object Detection and Tracking: A Comprehensive Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024.
- [24] Yu.S. Nefedova and A.A. Karankevich, "Development of a propagation channel model for a multi-position radar system", *Radar, Navigation, and Communication: Proceedings of the 16th International Scientific and Technical Conference*, Voronezh, 2010, vol. 3, pp. 1812-1819 (in Russian).
- [25] V.A. Pavelyev and D.V. Khaminov, "Scattering of millimeter-wave electromagnetic radiation by natural and anthropogenic objects", edited by Dr. V.L. Solunin, Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2009, 277 p. (in Russian).
- [26] D.N. Bezumnov and D.S. Chirov, "On Improving the Efficiency of the Technical Vision System of the Robotics Complex", *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2025, pp. 1-4, DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948107.
- [27] D.N. Bezumnov and D.S. Chirov, "Object recognition method based on complex data processing of the technical vision system of a ground-based unmanned vehicle", *Digital signal processing*, 2025, No. 2, pp. 36-39 (in Russian).
- [28] S.S. Adjemov, E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, "Algorithms of estimating and compensating the dispersion distortions of wideband signals in the HF channel," *H&ES Reserch*. 2021. Vol. 13. No. No.5, pp. 57-74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74 (In Rus)
- [29] D.S. Chirov, E.O. Lobova, "Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter bank. Theory and approbation," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 4, pp. 57-65.
- [30] O.G. Chertova, D.S. Chirov, "Building a core communication network which is based on small size unmanned aircraft vehicle without ground infrastructure," *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3, pp. 60-71. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10269
- [31] D.S. Chirov., E.M. Lobov, "Choice of signal-code constructure for the command-telemetry radio communication line with medium and long range unmanned aerial vehicles," *T-Comm*, 2017, vol. 11, no.10, pp. 21-28.

## ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ПРЕПЯТСТВИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**Безумнов Данил Николаевич**, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, [d.n.bezumnov@mtuci.ru](mailto:d.n.bezumnov@mtuci.ru)

**Чиров Денис Сергеевич**, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, [d.s.chirov@mtuci.ru](mailto:d.s.chirov@mtuci.ru)

### Аннотация

Одним из основных трендов развития робототехники является повышение автономности и интеллектуализации робототехнических комплексов. Основным источником данных для принятия решения и осуществления тех или иных действий РТК является система технического зрения. Поэтому совершенствование СТЗ и алгоритмов обработки данных от нее является важной задачей. В статье представлены результаты исследований по оценке плотности препятствия по измерениям радиолокационного канала системы технического зрения наземного робототехнического комплекса. Данная задача актуальна при автономном построении маршрута наземного РТК, т.е. когда НРТК строит маршрут самостоятельно из точки А в точку В и корректирует его в случае обнаружения препятствий. Очевидно, что в случае применения НРТК в сельской местности, оптический канал воспримет высокую траву как препятствие и начнет перестраивать маршрут, что может привести к удлинению пути или, в конечном счете, не выполнения задачи НРТК. Анализ существующих исследований показал, что оценить плотность препятствия возможно с использованием измерений РЛС мм-диапазона. Результаты оценки возможности определения плотности препятствий радиолокационным каналом бортовой СТЗ НРТК с использованием имитационной модели радиолокационного канала показали, что плотность препятствий может быть оценена по удельной ЭПР различных препятствий. Удельная ЭПР препятствий с наименьшими ошибками определяется на небольших расстояниях (порядка 10-15 м). Отдельные типы препятствий (деревья, кустарники, высокая трава) могут быть дополнительно отсекалированы по времени корреляции принятого сигнала, которое у них значительно ниже, чем у однородных твердых препятствий (стены из дерева или бетона, автомобиль). Принцип использования удельной ЭПР и времени корреляции сигнала зависит от типа классификатора (искусственная нейронная сеть, дерево решений и т.п.). Конкретной реализации данного алгоритма будут посвящены дальнейшие исследования авторов.

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, система технического зрения, радиолокационные измерения, обработка информации, распознавание объектов.

### Литература

1. Константинов И.С., Гайворонский В.А. Формирование данных о пространстве многокамерными видеосистемами // Экономика. Информатика. 2022. № 49(4). С. 863-870. DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-4-863-870.
2. Безумнов Д.Н., Чиров Д.С., Базылев М.В. Алгоритм классификации объектов на основе комплексной обработки данных системы технического зрения наземного робототехнического комплекса // Электросвязь. 2025. № 2. С. 40-45. DOI: 10.34832/ELSV.2025.64.2.006.
3. Singh P., Menkudale S., Soni S., Tank V., Raj A. Comprehensive Survey on Radar Systems and Its Target Classification Techniques // Journal of Electronics and Electrical Engineering, 2025, No. 1, pp. 234-269, DOI: 10.37256/jeee.4120255934.
4. Степанов П.В., Чиров Д.С. Методы идентификации источников радиоизлучения в экспертной системе анализа данных радиомониторинга // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 29 декабря 2021 г. М.: ФГБНУ "Экспертно-аналитический центр", 2022. С. 557-562.
5. Никоненко А.В., Чиров Д.С., Кучумов А.А. Облик многолучевой РЛС обнаружения малоразмерных воздушных целей // Труды Научно-исследовательского института радио. 2023. № 1. С. 39-43. DOI 10.34832/NIIR.2023.12.1.005.
6. Безумнов Д.Н., Чиров Д.С., Кореньков О.В. Метод комплексирования информации в системах технического зрения наземных робототехнических комплексов // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления : Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 07 ноября 2024 года. М.: ФГБНУ "Экспертно-аналитический центр", 2024. С. 460-467.
7. Агеев А.М., Бондарев В.Г., Проценко В.В. Обоснование выбора источников излучения для системы технического зрения в задаче автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 2. С. 239-245. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-875.
8. Чиров Д.С., Чертова О.Г., Потапчук Т.Н. Методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса // Труды СПИИРАН. 2017. № 2 (51). С. 152-176. DOI: 10.15622/sp.51.7.
9. Хрипунов С.П., Чиров Д.С. Методический подход по обоснованию целесообразности применения интеллектуальных информационных технологий при синтезе моделей управления сложными организационно-техническими системами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14. № 1. С. 39-47.
10. Wang Y., Li X., Yang X., Qi W., Zhang D., Wang J. Estimation of Picea Schrenkiana Canopy Density at Sub-Compartment Scale by Integration of Optical and Radar Satellite Images // Forests, 2024, No. 15, p. 1145, DOI: 10.3390/f15071145.
11. Bibicu D., Culea A., Moldovanu S., Moraru L. 2D multiple waves scattering for active detection of a dummy human body in a low frequency range and for various boundary conditions // Journal of Physics: Conference Series, 2024, No. 2701, p. 012012, DOI: 10.1088/1742-6596/2701/1/012012.

12. Bibicu D., Moldovanu S., Moraru L. Numerical evaluation of low frequency sound propagation in two layered media // Journal of Physics: Conference Series, 2019, No. 1391, p. 012032, DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012032.
13. Skaria S., Hendy N., Al-Hourani A. Machine Learning Methods for Material Identification Using mmWave Radar Sensor // IEEE Sensors Journal, 2022, pp. 1-1, DOI: 10.1109/JSEN.2022.3227207.
14. He C., Song J., Xu H. Optical and SAR Data Fusion Based on Transformer for Rice Identification: A Comparative Analysis from Early to Late Integration // Agriculture, 2025, No. 15, p. 706, DOI: 10.3390/agriculture15070706.
15. Jamali B., Ramalingam D., Babakhani A. Intelligent Material Classification and Identification Using a Broadband Millimeter-Wave Frequency Comb Receiver // IEEE Sensors Letters, 2020, pp. 1-1, DOI: 10.1109/LESENS.2020.3002715.
16. Bhattacharya C., Singh J., Sahu D., Mor V., Kumar A., Ravindra S. Real-Time product quality assurance management Using Vision sensor and Convolutional Neural Networks // International Conference on Data Processing and Networking (ICDPN-2024), 2025, DOI: 10.1007/978-981-96-3102-5\_21.
17. Weiss J., Santra A. One-Shot Learning for Robust Material Classification Using Millimeter-Wave Radar System // IEEE Sensors Letters, 2018, pp. 1-1, DOI: 10.1109/LESENS.2018.2878041.
18. Soumya A., Chalavadi K.M., Cenkeramaddi L.R. Recent Advances in mmWave-Radar-Based Sensing, Its Applications, and Machine Learning Techniques: A Review // Sensors, 2023, p. 23, DOI: 10.3390/s23218901.
19. Chan J., Evans P., Wang X., Godber S., Peatfield I., Rogers K., Rogers J., Dicken A. Scatter enhanced 3D X-ray imaging for materials identification // Proceedings - International Carnahan Conference on Security Technology, 2010, pp. 142-147, DOI: 10.1109/CCST.2010.5678684.
20. Dobmann G., Altpeter I., Sklarczyk C., Pinchuk R. Non-destructive testing with micro- and Mm-waves - where we are - where we go // Fraunhofer IZFP, 2013, No. 56, DOI: 10.1007/BF03321153.
21. Shehab M., Alkaltakchi M., Dukhan A., Woo W.L. Enhancing Ground Penetrating Radar (GPR) Data Analysis Utilizing Machine Learning // Journal of Engineering and Sustainable Development, 2025, No. 29, pp. 321-330, DOI: 10.31272/jeasd.2509.
22. Lasantha L., Ray B., Masoumi H., Karmakar N. Cross-Polarised Chipless RFID Sensor: A Novel Approach for Measuring Dielectric Constants in Solid Minerals and Rocks // IEEE Sensors Journal, 2025, pp. 1-1, DOI: 10.1109/JSEN.2025.3565761.
23. Shi K., Shi Z., Chen A., Xiong Z., Chen J., Luo J. Radar and Camera Fusion for Object Detection and Tracking: A Comprehensive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024.
24. Нефедова Ю.С., Каранкевич А.А. Разработка модели канала распространения многопозиционной радиолокационной системы // Радиолокация, навигация, связь: Труды XVI международной научно-технической конференции. Воронеж, 2010. Т. 3. С. 1812-1819.
25. Павельев В.А., Хашинов Д.В. Рассеяние электромагнитных волн миллиметрового диапазона природными и антропогенными объектами / под ред. д-ра техн. наук В.П. Солунина. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 277 с.
26. Bezumnov D.N., Chirov D.S. On Improving the Efficiency of the Technical Vision System of the Robotics Complex // 2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2025, pp. 1-4, DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948107.
27. Безумнов Д.Н., Чиров Д.С. Метод распознавания объектов на основе комплексной обработки данных системы технического зрения наземного беспилотного транспортного средства // Цифровая обработка сигналов. 2025. № 2. С. 36-39.
28. Аджемов С.С., Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О., Липаткин В.И. Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолоний связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 5. С. 57-74.
29. Chirov D.S., Lobova E.O. Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approbation // T-Comm. 2020. Т. 14. № 4. С. 57-65.
30. Чертова О.Г., Чиров Д.С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 60-71.
31. Чиров Д.С., Лобов Е.М. Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 10. С. 21-28.

#### **Информация об авторах:**

**Безумнов Данил Николаевич**, старший преподаватель, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

**Чиров Денис Сергеевич**, заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

# DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE COMPUTATIONAL MODEL FOR TRACTION-DYNAMIC ANALYSIS OF ARTICULATED VEHICLES

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-65-72

**Manuscript received** 02 December 2025;  
**Accepted** 05 February 2026

*This article has been prepared as part of a research project funded by the federal budget (the source of funding is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation) on the topic: "Development of a scientific and methodological apparatus for synthesizing optimal solutions for energy-efficient operation of semi-trailers on federal roads of the Russian Federation, taking into account remote monitoring and forecasting of operational characteristics in relation to the road network" (code of the scientific topic FFSM-2025-0001).*

**Keywords:** traction and dynamic characteristics, transport modeling, tractor units, vehicle efficiency, high load capacity, kinematic drive scheme

**Nikolay I. Vatin,**

MADI, Moscow, Russia, [vatin@mail.ru](mailto:vatin@mail.ru)

**Alexey V. Terentyev,**

MADI, Moscow, Russia, [aleksej.terentev.67@bk.ru](mailto:aleksej.terentev.67@bk.ru)

**Artyom V. Podgorny,**

MADI, Moscow, Russia, [pavtxt@mail.ru](mailto:pavtxt@mail.ru)

**Dmitry S. Taldykin,**

MADI, Moscow, Russia, [dima.dima.taldykin@mail.ru](mailto:dima.dima.taldykin@mail.ru)

This study examines the traction and dynamic characteristics of an articulated road train in order to develop a predictive mathematical and software modeling system for heavy-duty transport systems. The design, mass, aerodynamic and transmission parameters of the main tractor in combination with the semi-trailer were analyzed and a structured data set for computer modeling was formed. To formalize the sequence of torque transmission from the internal combustion engine to the drive axle, a kinematic scheme of the power unit was developed. Based on the collected parameters, a traction-dynamic mathematical model of motion was formulated in differential form, taking into account the characteristics of engine torque, transmission ratios, rolling resistance, aerodynamic drag and road slope. The proposed model was implemented in the form of a computing core that allows performing time domain modeling and predicting non-stationary operating modes. The interaction between engine characteristics, transmission configuration, and drag was analyzed using numerical integration of control equations. The obtained results made it possible to identify the key factors determining the balance of traction, acceleration capacity and energy efficiency of a road train in various operating conditions. The developed mathematical and software model forms the methodological basis for creating digital twins, computer modeling tools and information forecasting systems aimed at improving fuel efficiency, operational reliability and energy efficiency of articulated heavy-duty vehicles.

## Information about authors:

**Nikolay I. Vatin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms, MADI, Moscow, Russia

**Alexey V. Terentyev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms, MADI, Moscow, Russia

**Artyom V. Podgorny**, post-graduate student, Lecturer at the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms, MADI, Moscow, Russia

**Dmitry S. Taldykin**, PhD student, Assistant Professor of the Department of Mechanical Engineering "Machine Parts and Theory of Mechanisms", MADI, Moscow, Russia

## Для цитирования:

Ватин И.И., Терентьев А.В., Подгорный А.В., Талдыкин Д.С. Разработка прогнозирующей вычислительной модели для тягово-динамического анализа сочлененных автотранспортных средств // Т-Комм: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 65-72.

## For citation:

N.I. Vatin, A.V. Terentyev, A.V. Podgorny, D.S. Taldykin, "Development of a predictive computational model for traction-dynamic analysis of articulated vehicles," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 2, pp. 65-72.

## Introduction

The study of traction and dynamic properties of modern truck tractors represents a fundamental research direction in the automotive and transport engineering domain, directly aimed at improving transport efficiency, fuel economy, operational reliability and traffic safety. Over the past decades, long-distance freight transport systems have undergone significant transformation, driven by the continuous growth of cargo flows, increasing traffic intensity on federal highways, and the widespread adoption of articulated vehicles with high payload capacity. In contemporary operating conditions, the gross weight of road trains commonly exceeds 40 tons, which imposes strict requirements on powertrain performance, traction balance and stability of motion [1, 2].

Under these conditions, the adequacy of engine characteristics, transmission configuration and traction reserve becomes a determining factor for ensuring reliable operation of road trains across a wide range of road, climatic and load conditions. Insufficient traction capability leads to reduced average speeds, increased fuel consumption and accelerated wear of drivetrain components, while excessive power margins negatively affect energy efficiency and operating costs. Consequently, traction–dynamic analysis plays a critical role in both the design and operational optimization of heavy-duty vehicles.

Tractor units operating as part of articulated road trains exhibit complex traction and dynamic behavior. Vehicle performance is determined by the interaction of multiple subsystems, including the engine torque characteristic, transmission gear ratios, tire–road adhesion properties, rolling resistance and aerodynamic drag. In contrast to single vehicles, articulated configurations introduce additional complexity related to mass distribution, load transfer to the driving axle and increased aerodynamic resistance. These factors significantly influence acceleration dynamics, gradeability and motion stability.

The dynamic behavior of heavy-duty road trains cannot be adequately evaluated using simplified stationary or quasi-static models. Real-world operating conditions are characterized by non-stationary regimes such as acceleration, deceleration, gear shifting and motion on variable longitudinal gradients. In addition, resistance forces vary dynamically depending on road surface condition, vehicle speed and environmental factors. The resulting distribution of energy between driving forces and resistance forces determines key operational parameters, including acceleration time, maximum achievable speed and overall traction efficiency [3].

The traction characteristics of truck tractors are strongly influenced by both design parameters and operational factors. Engine specific power (expressed in kW/t), the width and structure of the transmission ratio range, and drivetrain losses determine the efficiency of converting fuel energy into useful mechanical work. At the same time, aerodynamic properties and vehicle mass play a decisive role at medium and high speeds, where aerodynamic drag becomes the dominant resistance component. For articulated vehicles equipped with semi-trailers, the drag coefficient typically ranges from 0.55 to 0.70, making aerodynamic optimization and accurate modeling particularly important.

In modern conditions, a prevailing trend in the development of heavy-duty transport systems is the widespread integration of digital modeling and computer-based simulation methods. These methods enable the prediction of traction and dynamic

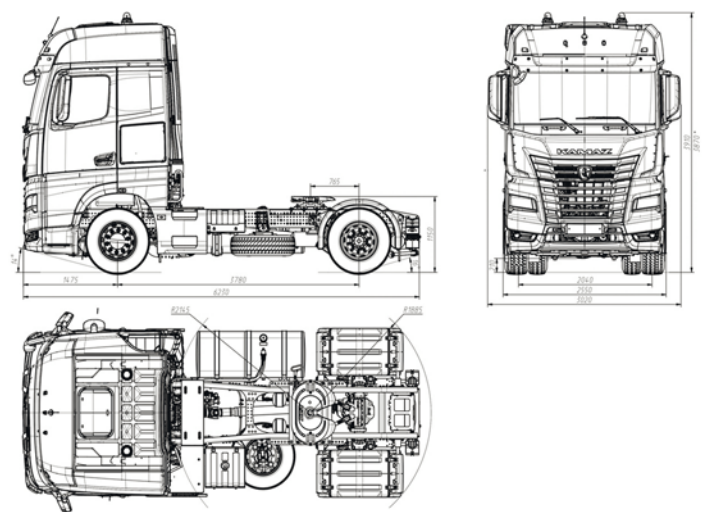
characteristics with a high degree of accuracy prior to conducting time-consuming and costly field tests [4]. Parametric and mathematical models allow researchers and engineers to assess the influence of vehicle mass, aerodynamic properties, transmission parameters and road conditions on traction balance, acceleration dynamics and energy consumption. Simulation-based approaches provide a powerful tool for optimizing drivetrain configuration and ensuring stable vehicle operation under variable loads and operating scenarios, while minimizing energy losses and emissions [5-7, 16-17].

In addition, the rapid development of onboard electronic systems, telematics and data acquisition technologies creates new opportunities for the application of predictive models in real operational environments. Traction–dynamic models implemented in software form can serve as computational cores for digital twins, decision-support systems and energy-efficient driving assistance tools. Such systems enable the transition from reactive to predictive vehicle operation strategies, thereby improving fuel efficiency and operational reliability.

In the context of increasing economic, environmental and technological requirements, improving traction and dynamic characteristics becomes a key factor in the modernization of the national heavy-duty vehicle fleet. The scientific challenge addressed in this study lies in the development of analytical and computational relationships linking traction forces, resistance components and acceleration parameters of articulated vehicles under diverse operating conditions. The purpose of this study is to develop a framework for predictive mathematical and computer-based modeling of traction and energy efficiency of road trains, providing a methodological and informational basis for further integration into digital and electronic transport systems operating under various road and climatic conditions.

## Materials and methods

This study is devoted to the KAMAZ-54901-92 mainline tractor (Fig. 1), which is equipped with a KAMAZ-910.12-450 diesel engine.



**Figure 1.** General view drawing of KAMAZ-54901-92

The power unit of the studied vehicle, the KAMAZ-910.12-450 diesel engine, serves as the main source of energy determining

the traction and dynamic potential of the KAMAZ-54901-92 tractor [8]. It is a six-cylinder inline diesel engine with turbocharging, direct fuel injection and intercooling. It has been designed to provide high torque at low and medium crankshaft speeds and maintain fuel economy during load fluctuations typical for long-haul transportation.

The maximum effective engine power is 331 kW at 1,900 rpm, and the corresponding maximum torque of 2,060 Nm is reached at 1,300 rpm. It is argued that the torque level under consideration guarantees stable traction characteristics in the most commonly used range of road speeds and gear ratios. The configuration of the torque curve contributes to the efficient use of the transmission range, thereby ensuring the maintenance of an almost constant traction force on several intermediate gears [9, 10]. This is especially true when driving in mixed traffic and on uneven roads, where frequent gear changes are required.

The specific effective fuel consumption of the engine is 183 g/kWh, which corresponds to a fuel density of 0.85 kg/liter. According to the nominal operating conditions, the practical fuel consumption is approximately 60-65 liters/h. This provides a basic basis for determining the energy intensity of the movement and building fuel economy maps in the subsequent stages of the study.

The average effective pressure at maximum torque can be estimated as:

$$p_{me} = \frac{2\pi \cdot M_e}{V_h} \approx 1,85 \text{ MPa},$$

It is assumed that the total volume of the engine is 12.0 liters, which is typical for engines of this class. This value confirms the high level of cylinder loading, which corresponds to the performance targets of Euro V–VI diesel units. The mechanical efficiency of the engine at rated load reaches a value of approximately 0.86, while the overall efficiency at rated conditions approaches a value of approximately 0.40. This indicates the optimal conversion of the chemical energy of the fuel into useful mechanical work of the crankshaft [11-13].

The modern power plant of a mainline tractor operates as a cyberphysical system in which torque generation is carried out not only as a result of thermodynamic processes in the cylinders, but also through continuous intelligent data processing from a distributed set of sensors integrated into the electronic architecture of the vehicle. The electronic engine control unit is a real-time computing module connected to the crankshaft position sensor, camshaft position sensor, intake air pressure and temperature sensors, mass air flow sensor, fuel ramp pressure sensor, coolant and exhaust gas temperature sensors, accelerator pedal position sensor, turbocharger boost sensor, and also with an exhaust composition control system. The signals of these sensors are subjected to high-frequency sampling, digital filtering and algorithmic verification for reliability, after which an estimate of the current engine operating mode is formed, characterized by instantaneous load, rotational speed, injection phase, cylinder filling degree and effective air excess coefficient. Information processing is carried out within the framework of built-in control algorithms that implement fuel injection models, temperature and altitude correction, turbocharger geometry control and torque limitation in accordance with permissible mechanical and thermal loads. Unlike the traditional representation of the engine as a static torque source, the intelligent control system generates adaptive output torque based on the current state of the transmission, road resistance and driver

commands, ensuring the coordination of energy flows between the power unit and the moving mass of the train. Information is transmitted between electronic units via a high-speed CAN bus, which ensures synchronization of the engine control unit, transmission control unit, traction control system and stabilization modules, forming a single distributed computing environment. Within the framework of this architecture, data on engine speed, current torque, boost pressure, fuel consumption and temperature conditions are available for subsequent integration into telematics modules and external information systems, which allows for a continuous flow of operational parameters into the digital twin of the vehicle. The integration of the computational core of the traction-dynamic model with real telematics data flows ensures the transition from a priori modeling to adaptive forecasting, in which the parameters of motion resistance, coefficient of adhesion and energy efficiency are refined based on current operational measurements. When the road profile or load dynamics change, the engine control system automatically adjusts the duration and phase of fuel injection, limits or increases the supply in accordance with the transmission and clutch protection algorithm, and also interacts with the gearbox control module to optimize the timing of gear shifting. Thus, a closed control loop is formed, in which sensory measurements are transformed into control actions that directly affect the longitudinal dynamics of the train, and the power plant itself becomes an active intelligent element of the transport system [14]. The inclusion of electronic engine control dynamics in the structure of the traction-dynamic model makes it possible to take into account the inertia of the fuel system, turbocharging delays, temperature restrictions and adaptive protection algorithms, which significantly increases the accuracy of predicting transient conditions, especially during acceleration, uphill movement and operation under variable load. Collectively, the described sensor architecture (Fig. 2), computing modules and network protocols form the basis of an intelligent power plant control system that provides not only optimal conversion of chemical fuel energy into mechanical operation, but also the ability to integrate into predictive information and control systems aimed at improving energy efficiency, operational reliability and stability of heavy articulated vehicles in the digital transformation of the transport industry.

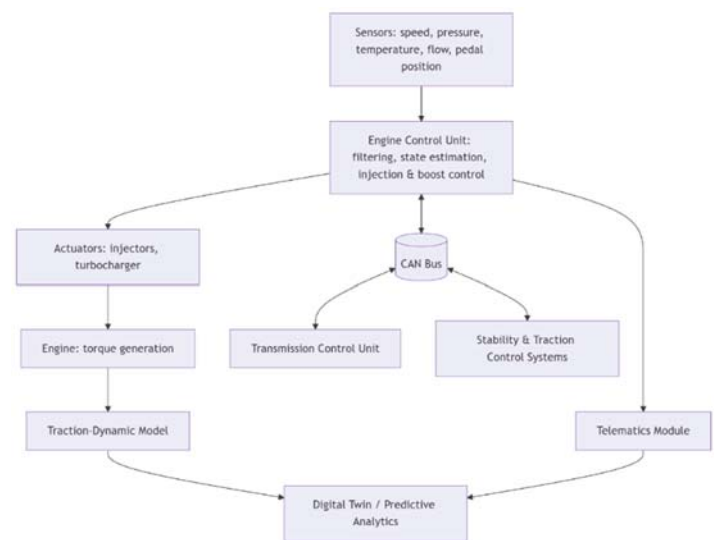


Figure 2. Architecture of the intelligent internal combustion engine system

In the context of the traction–dynamic model, the torque characteristics of the engine are defined as the available traction force on the drive wheels in accordance with the following equation:

$$P_t = \frac{M_e \cdot \eta_{tr}}{r_{st} \cdot U_{tr}},$$

where  $\eta_{tr} = 0.902$  is the transmission efficiency,  $r_{st} = 0.74$  m is the static radius of the wheel, and  $U_{tr}$  is the total transmission ratio. For example, in first gear ( $U_{tr} = 37.997$ ) and at maximum torque ( $m_e = 2060$  Nm), the traction force on the drive wheels reaches  $\approx 66.7$  kN; in sixth gear ( $U_{tr} = 10.388$ ), this value decreases to  $\approx 24.4$  kN, which illustrates the expected inverse proportionality between an increase in torque and an increase in the rotation speed. output speed.

The inertia of the engine, characterized by a reduced moment of inertia  $J_e = 1.6$  kg m<sup>2</sup>, is a key parameter in the analysis of transients, affecting acceleration dynamics and response time when shifting gears. In low gears, inertia helps maintain rotational stability, while in high gears it limits the rate of torque increase, which is especially important when accelerating or climbing a slope [15].

The Tonar T3-13 semi-trailer (Fig. 2) in combination with the KAMAZ-54901-92 mainline tractor is a standard three-axle truck cargo platform designed for long-distance cargo transportation under heavy load conditions. The structural configuration and weight distribution parameters of a vehicle directly affect its traction and dynamic characteristics, affecting axle load, braking stability, aerodynamic drag and rolling resistance.

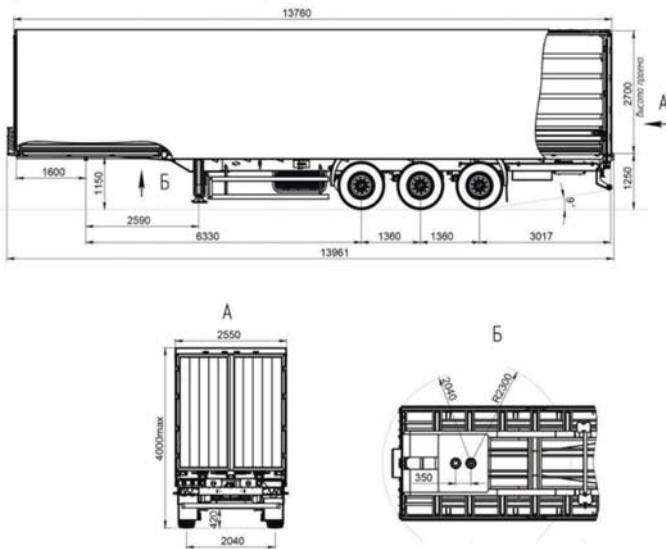


Figure 3. Dimensional drawing of Tonar T3-13

The curb weight of the semi-trailer is 7,300 kg, and the gross weight is 35,600 kg, which provides a load capacity of about 28,000 kg. In the loaded state, the three-axle trolley evenly distributes the total mass between the axles, thereby maintaining the stability of the vehicle both in linear motion and during acceleration or deceleration. When empty, the semi-trailer operates with two touching axles (reduced configuration), which reduces rolling resistance and tire wear. The single-wheel configuration on each axle provides a balance between load capacity and mass efficiency, while maintaining acceptable resistance to lateral skidding on curved paths.

The T3-13 tonar is 13.96 meters long, 2.55 meters wide, and 4.00 meters high. These measurements, which are of great importance in the field of aerodynamics, lead to an increase in the frontal area, which directly affects the overall aerodynamic drag of an articulated road train. The track width is 2.04 m. and the optimized rigidity of the frame ensures sufficient torsional rigidity, thereby minimizing load fluctuations at high speeds. The semi-trailer is connected by means of a coupling device located on the tractor frame at an optimal distance, so that the total length of the road train is 16.65 m, and the total area of the front edge  $F_a$  is 6.94 m<sup>2</sup>.

The aerodynamic characteristics of the T3-13 Tonar are represented by the shape coefficient  $Ao = 0.85$  and the drag coefficient  $K = 0.59$  N·s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>. At a cruising speed of  $v = 25$  m/s (approximately 90 km/h), the semi-trailer accounts for about 40-45% of the total aerodynamic drag of the road train, which is equivalent to an additional drag of about 900-1000 N. This level of drag depends not only on the geometric proportions, but also on the quality of the surface, the blowing of the bottom of the body and the presence of turbulence at the rear.

From the point of view of traction analysis, a semi-trailer acts as a passive load with variable mass characteristics, primarily affecting overall movement resistance due to rolling resistance and aerodynamic drag. The coefficient of rolling resistance under various road conditions corresponds to the general system values: 0.02 for dry asphalt, 0.04 for wet asphalt, 0.06 for packed snow and 0.03 for wet ice. At full load ( $G_c = 35,600$  kg), the rolling resistance on dry asphalt is approximately:

$$P_f = f \cdot G \cdot g = 7,0 \kappa H$$

To determine the total thrust requirement, this component must be added to the drag forces acting on the tractor.

The weight and aerodynamic parameters of a semi-trailer significantly affect the transmission of the longitudinal load between the axles of the tractor. In the coupled state, the vertical load on the fifth wheel is approximately 7.5-8.0 tons, resulting in a load factor on the drive axle of 29.7% for one tractor and 26.1% for the entire road train. This redistribution determines the available coefficient of adhesion and, consequently, the traction potential, especially on surfaces with a low coefficient of friction.

The Tonar T3-13 uses an air suspension with automatic control, which ensures stable axle load under various conditions of cargo transportation. This design minimizes dynamic fluctuations during acceleration and braking, which contributes to uniform tire wear and improved braking performance. The suspension characteristics are selected in such a way as to maintain stability when driving and reduce the vertical acceleration transmitted to the tractor coupling. This is important for the comfort of the driver and to prevent the coupling device from oscillating.

At this stage of the study, the semi-trailer is considered as a rigid inertial subsystem within the framework of the traction-dynamic model. It provides constant drag proportional to its mass and aerodynamic properties. Subsequent stages of research will make it possible to expand the model to include the elastic and damping parameters of the coupling device, the dynamic interaction between the tractor and the semi-trailer, as well as the oscillatory effects caused by the roughness of the road profile. This will allow for a more detailed assessment of the stability of the articulated system, braking performance and fuel economy in real-world operating conditions.

**Results and discussion**

At this stage of the research, a basic data set was formed for further traction and dynamic modeling of the KAMAZ-54901-92 tractor in combination with the Tonar T3-13 semi-trailer.

The purpose of the data set formation is to ensure the formation of a database for further analytical refinement, including consideration of dynamic resistances, gradient effects and transient operating modes. The selected parameters describe the mass, size, aerodynamic, propulsion and transmission characteristics of the vehicle system specified in the initial description of measurements and technical characteristics.

Table 1

Initial data for the study of traction and dynamic characteristics using the example of a KAMAZ tractor combination-54901-92 + Tonar T3-13 trailer

Parameter	Symbol / Unit of measurement	Meaning	Description / Notes
Model	-	KAMAZ-54901-92	Two-axle mainline tractor (4×2)
Semi-trailer model	-	Tonar T3-13	Three-axle cargo semi-trailer
Curb weight	$G_{st}$ , kg	8400	Without a semi-trailer
Curb weight of semi-trailer	$G_{sp}$ , kg	7300	Empty configuration
Total weight of the semi-trailer	$G_{pp}$ , kg	35600	Fully loaded
Gross weight	$G_{pa}$ , kg	44000	Tractor + loaded semi-trailer
Total length	$L_a$ , m	16.65	Full hinge system
Tractor dimensions (L×B×H)	m	6.25 × 2.55 × 3.98	Length, width, height
Semi-trailer dimensions (L×B×H)	m	13.96 × 2.55 × 4.00	-
Tractor wheelbase	$L_b$ , m	3.78	The distance between the axes
Track width	$B_a$ , m	2.04	For both tractor and trailer
Axle load distribution (rear)	%	29.7 (tractor), 26.1 (combination)	-
The front part of the tractor	$F_t$ , m <sup>2</sup>	6.50	-
Frontal area	$F_a$ , m <sup>2</sup>	6.94	-
Shape coefficient	$A_a$	0.85	For the combination
Drag coefficient	$K_{oa}$ , N·s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup>	0.59	For the combination
Engine model	-	KAMAZ-910.12-450	Turbocharged diesel engine
Rated power	$N_{e,max}$ , kWt	331 @ 1900 rpm	Effective power
Maximum torque	$M_{e,max}$ , Nm	2060 @ 1300 rpm	-
Specific fuel consumption	$g_e$ , g/kVth	183	Nominal
Fuel density	$\rho_t$ , kg/l	0.85	Diesel fuel
Equivalent inertia of the engine	$J_e$ , kg·m <sup>2</sup>	1.6	-

Transmission type	-	12-speed manual	Permanent gear box
Gear ratios (1 – 12)	$U_i$	16.68 – 1.00	-
The final gear ratio of the drive	$U_{gp}$	2.278	-
Total coefficients (1-12)	$U_{tr}$	37.997 – 2.278	-
Transmission efficiency	$\eta_{kp}$	0.965	-
Efficiency of the final drive	$\eta_{gp}$	0.935	-
Overall transmission efficiency	$\eta_{tr}$	0.902	The average value
Tire size	-	R22.5	Standard double tire
Free radius	$r_k$ , m	0.79	-
Static radius	$r_{st}$ , m	0.74	Used in the calculation of thrust
Tire deformation coefficient	$\lambda$	0.94	-
Coefficient of clutch safety margin	$\beta$	2.5	Wheel slip protection
Rolling resistance coefficients (f)	-	0.02 – 0.06	Dry – ice
Coupling coefficients ( $\phi$ )	-	0.75 – 0.07	Dry asphalt – wet snow
Single gear shift time	$t_3$ , s	0.20	To enter dynamic modeling data

The table above shows the basic configuration parameters necessary to start research on thrust–dynamic calculations. Each parameter represents verified input data for subsequent steps, including:

- construction of diagrams of the dependence of traction force and speed;
- modeling acceleration characteristics under various road surface conditions;
- valuation of transmission efficiency and power losses;
- Development of digital modeling modules for a complete combination.

This structured data set completes the preparatory analytical stage of the study. At the next stage of the study, the input variables will be used to calculate traction balance curves, determine traction limit zones, and verify the validity of the preliminary model using experimental measurements on test routes.

As part of the study of traction-dynamic properties, a kinematic scheme of the car's power unit was also developed in order to formalize the structure of torque transmission from the internal combustion engine to the drive axles through the gearbox and transmission system. The schematic diagram (Fig. 4) reflects the general configuration of the KAMAZ-54901-92 tractor and corresponds to its actual mechanical structure.

The torque at the engine output is first transmitted to the gearbox, then through the driveshaft to the main gear and the differential, which distribute the torque to the rear drive axle. Each subsystem is presented functionally, demonstrating the mechanical interaction between the engine, transmission, universal joints, main drive and groups of axles.

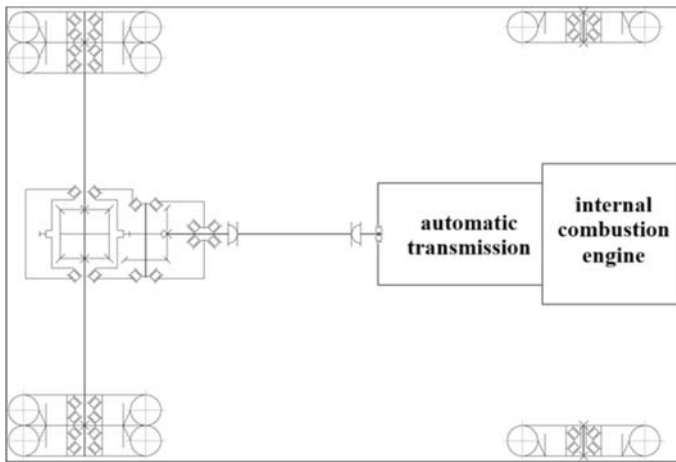


Figure 4. Kinematic transmission diagram of a tractor unit

This scheme is the conceptual basis for determining the main energy losses, determining the overall gear ratio, and determining the components necessary for the design model of thrust dynamics. The configuration corresponds to the 4x2 drive scheme, which is typical for long-haul tractors designed for long-haul transportation.

At the next stage of the study, the emphasis was placed on the development of a predictive mathematical model of the traction–dynamic behavior of an articulated vehicle and on its software implementation for use in computer simulation and information systems. This approach made it possible to move from a static analysis of traction parameters to the forecasting of vehicle motion under non-stationary operating conditions.

The mathematical model of longitudinal motion of the road train was formed on the basis of the traction balance, taking into account the reduced inertial mass of the system and the total resistance to motion. In differential form, the governing equation of motion can be written as:

$$M_{eq} \frac{dv(t)}{dt} = \frac{\eta_{tr} M_e(n(t)) u_{tr}}{r_{st}} - \left[ Gf \cos \alpha + G \sin \alpha + \frac{1}{2} \rho C_d F_a v^2(t) \right],$$

where  $v(t)$  is the vehicle speed,  $M_{eq}$  is the equivalent mass of the road train accounting for rotating inertias,  $M_e(n)$  is the engine torque as a function of crankshaft speed  $n$ ,  $u_{tr}$  is the total transmission ratio,  $\eta_{tr}$  is the overall transmission efficiency,  $r_{st}$  is the static wheel radius,  $G$  is the vehicle weight,  $f$  is the rolling resistance coefficient,  $\alpha$  is the longitudinal road slope angle,  $\rho$  is air density,  $C_d$  is the aerodynamic drag coefficient, and  $F_a$  is the frontal area of the road train.

This formulation explicitly reflects the physical mechanisms governing vehicle motion and enables time-domain simulation of acceleration, deceleration and steady-state regimes. The use of a differential equation provides the basis for numerical integration and makes the model suitable for forecasting applications.

To verify the practical applicability of the developed mathematical formulation, the model was implemented in the form of a computational kernel (Fig. 5). The software realization directly encodes the right-hand side of the governing equation and allows the calculation of instantaneous acceleration for given operating conditions. A fragment of the program code implementing the mathematical model is presented below.

```
import math

g = 9.80665

def engine_torque(n_rpm):
    # approximation of M_e(n), Nm
    n = max(600.0, min(n_rpm, 2100.0))
    if n <= 1300.0:
        return 1000.0 + (2060.0 - 1000.0) * (n - 600.0) / (1300.0 - 600.0)
    if n <= 1600.0:
        return 2060.0 - 200.0 * (n - 1300.0) / 300.0
    return 1860.0 - 600.0 * (n - 1600.0) / 500.0

def traction_force(n_rpm, u_tr, eta_tr, r_st):
    return (eta_tr * engine_torque(n_rpm) * u_tr) / r_st

def resistance_forces(v, m, f, c_aero, grade_rad):
    F_roll = m * g * f * math.cos(grade_rad)
    F_grade = m * g * math.sin(grade_rad)
    F_aero = c_aero * v * v
    return F_roll + F_grade + F_aero

def dv_dt(v, n_rpm, params):
    F_tr = traction_force(n_rpm, params["u_tr"], params["eta_tr"], params["r_st"])
    F_res = resistance_forces(v, params["m"], params["f"], params["c_aero"], params["grade_rad"])
    return (F_tr - F_res) / params["m"]
```

Figure 5. A fragment of the program code of the computational core of the mathematical model of a tractor unit

The presented code fragment implements the computational core of the forecasting traction–dynamic model and directly corresponds to the analytical formulation of the governing equation. Numerical integration of this equation makes it possible to obtain time histories of vehicle speed, acceleration and traction reserve for various operating scenarios.

The simulation results demonstrate that the developed model adequately reproduces the transition between resistance-dominated and traction-limited regimes of motion. At low vehicle speeds, the acceleration capability is mainly determined by rolling resistance and the selected transmission ratio, while at cruising speeds aerodynamic drag becomes the dominant factor limiting further acceleration. This behavior is consistent with the physical characteristics of heavy-duty road trains and confirms the validity of the proposed model.

From the standpoint of applied use, the developed mathematical and software model can serve as the core of digital twins, predictive information systems, and decision-support tools for the operation of articulated vehicles. Its modular structure and explicit physical interpretation make it suitable for further extension, including integration with onboard electronic systems, telematics data and adaptive control algorithms.

### Conclusion

The analysis confirmed that the traction potential and overall energy efficiency of articulated vehicles are primarily determined by the balance between the characteristics of the engine torque, the choice of transmission ratio and the total drag forces acting on the road train. It has been demonstrated that the aerodynamic configuration and weight distribution of a semi-trailer significantly affect the load transfer to the tractor's drive axle, thereby affecting the available traction, acceleration capacity and longitudinal stability of the vehicle as a whole.

An important result of the research is the transition from descriptive traction analysis to the formation of a predictive mathematical model of longitudinal motion implemented as a computational core. The developed differential formula of traction–dynamic balance and its software implementation confirm the possibility of modeling non-stationary modes of operation in the time domain, including acceleration at various road slopes, surface condition and load.

The results obtained at this stage represent not only a structured set of verified source data, but also a methodological and computational basis for the development of digital tools for analyzing and predicting vehicle characteristics. The implemented model creates prerequisites for numerical integration, scenario-based modeling, and calculation of key performance indicators, including thrust reserve, acceleration dynamics, and drag zones. This allows the model to be directly integrated into computer simulation environments, digital counterparts, and decision support information systems.

Future research is expected to expand and validate the developed model, including the inclusion of detailed engine maps, consideration of rotational inertia and elastic properties of the clutch system, as well as experimental verification in changing road and climatic conditions. Special attention will be paid to the integration of the computing core with on-board electronic systems and telematics data, which will make it possible to predict traction and energy parameters in almost real time.

In general, this work provides a scientific, methodological, and software-oriented framework for creating advanced forecasting and information systems aimed at improving energy efficiency, operational reliability, and technological competitiveness of articulated cargo vehicles. The proposed approach supports the strategic goals of modernization, sustainable development and technological sovereignty of the national automotive industry, especially in the context of long-distance freight transportation.

### Appreciation

This article has been prepared as part of a research project funded by the federal budget (the source of funding is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation) on the topic: "Development of a scientific and methodological apparatus for synthesizing optimal solutions for energy-efficient operation of semi-trailers on federal roads of the Russian Federation, taking into account remote monitoring and forecasting of operational characteristics in relation to the road network" (code of the scientific topic FFSM-2025-0001).

### References

- [1] D. Yu. Malakhov, A. V. Vasiliev, D. S. Taldykin, "Modeling the dynamics of an amphibious auger-rotor platform moving on land," *DSPA: Issues of Application of Digital Signal Processing*. 2025. Vol. 15, No. 3, p. 50-55.
- [2] A. A. Akulov, V. S. Ershov, D. A. Kalintsev, D. S. Taldykin, "Process management in industry and logistics: increasing efficiency and productivity," *XIV All-Russian Conference on Control Problems: Collection of Scientific Papers*, Moscow, June 17-20, 2024. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, 2024, pp. 1823-1829.
- [3] N. S. Zakharov, V. V. Popcov, N. O. Sapozhenkov, "Adjusting the Maintenance Frequency of Tractor Unit Brake Systems," *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2022. No. 11, pp. 55-57.
- [4] S. D. Shepelev, A. V. Kletsov, K. E. Gerl, "Performance of Tractor Units in Intercity Transport," *Transport Planning and Modeling: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, St. Petersburg, May 26-27, 2016 / St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; Association of Transport Engineers. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2016, pp. 82-85.
- [5] M. Yu. Karelina, A. V. Podgorny, V. V. Filatov, D. S. Taldykin, "Relevance of Developing a Method for Assessing the Efficiency of Buses Based on a Set of Technical and Commercial Operation Indicators," *Transport Business of Russia*. 2024. No. 3, pp. 257-260.
- [6] N. S. Zakharov, M. V. Nemkov, V. M. Nemkov, "Methodology for Selecting the Brand Composition of Tractor Units Using the Integral Coefficient," *Intelligence. Innovations. Investments*. 2021. No. 6, pp. 88-95. DOI 10.25198/2077-7175-2021-6-88.
- [7] M. Yu. Karelina, A. V. Terentyev, S. D. Shagunov, "Freight flow management in a transport and logistics system based on infinite logic models," *Sustainable development of urban transport in the Russian Federation: Collection of scientific articles dedicated to the 95th anniversary of the Research Institute of Automobile Transport*. Moscow: Izdatelstvo "Econ-Inform", 2025, pp. 67-84.
- [8] N. V. Soloviev, M. Yu. Karelina, "Information criterion model for assessing production efficiency in various modes of transport," *Transport technician: education and practice*. 2025. Vol. 6, No. 2, pp. 176-181. DOI 10.46684/2687-1033.2025.2.176-181.
- [9] V. I. Poddubny, A. I. Valekzhanin, M. L. Poddubnaya, "Mechanics and mathematical model of a truck tractor with a two-axle semi-trailer," *Polzunovsky Vestnik*. 2016. No. 1, pp. 43-47.
- [10] M. Yu. Karelina, Yu. N. Rizaeva, V. V. Baev et al., "Improving the efficiency of the transport and technological system," *Transport Business of Russia*. 2024. No. 2, p. 192-196.
- [11] N. A. Maslov, "Traction calculation and determination of the parameters of the auxiliary drive of the chassis equipment of a road train tractor," *Energy and resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries: Proceedings of the international scientific and practical conference*, Belgorod, October 17-19, 2019. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2019, pp. 114-122.
- [12] Yu. D. Shevtsov, A. D. Nirov, M. M. Zhuravlev et al., "Creation of an experimental database for the purpose of developing intelligent control systems for internal combustion engines," *Mechanics, equipment, materials and technologies: Electronic collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference*, Krasnodar, November 29-30, 2022. Krasnodar: PrintTerra LLC, 2022, pp. 1014-1019.
- [13] Yu. D. Shevtsov, A. D. Nirov, L. N. Dudnik, M. M. Zhuravlev, "Study of the heat balance of internal combustion engines for the development of intelligent control systems in vehicle engines," *Electronic online polythematic journal "Scientific works of KubSTU"*. 2023. No. 6, pp. 63-77.
- [14] A. Yu. Rodichev, K. K. Nastepanin, I. V. Rodicheva, K. V. Vasiliev, "Intelligent system for diagnosing the state of vehicle systems and units," *The World of Transport and Technological Machines*. 2022. No. 4-1 (79), pp. 3-12. DOI 10.33979/2073-7432-2022-1 (79) -4-3-12.
- [15] N. S. Yankevich, A. I. Antonevich, "Methodology for preventive identification of the technical condition of vehicles of the intelligent transport system," *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2025. No. 2 (87), pp. 69-79. DOI 10.24412/2077-8481-2025-2-69-79.
- [16] A.P. Buslaev, D.A. Kuchelev, M.V. Yashina, "Dynamical systems and mathematical models of information traffic," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.3, pp. 22-38.
- [17] A.S. Bugaev, A.G. Tatashev, M.V. Yashina, O.S. Lavrov, E.A. Nosov, "Reconstruction of traffic flow dynamics based on deterministic stochastic model and data obtained from intelligent transport systems," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no.10, pp. 35-44.

## РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СОЧЛЕНЕННЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Ватин Николай Иванович**, МАДИ, Москва, Россия, [vatin@mail.ru](mailto:vatin@mail.ru)

**Терентьев Алексей Вячеславович**, МАДИ, Москва, Россия, [aleksej.terentev.67@bk.ru](mailto:aleksej.terentev.67@bk.ru)

**Подгорный Артем Велимирович**, МАДИ, Москва, Россия, [pavtxt@mail.ru](mailto:pavtxt@mail.ru)

**Талдыкин Дмитрий Сергеевич**, МАДИ, Москва, Россия, [dima.dima.taldykin@mail.ru](mailto:dima.dima.taldykin@mail.ru)

### Аннотация

В данном исследовании рассматриваются тяговые и динамические характеристики сочлененного автопоезда с целью разработки прогностической системы математического и программного моделирования для транспортных систем большой грузоподъемности. Были проанализированы конструктивные, массовые, аэродинамические и трансмиссионные параметры основного тягача в сочетании с полуприцепом и сформирован структурированный набор данных для компьютерного моделирования. Для формализации последовательности передачи крутящего момента от двигателя внутреннего сгорания к ведущему мосту была разработана кинематическая схема силового агрегата. На основе собранных параметров была сформулирована тягово-динамическая математическая модель движения в дифференциальной форме, учитывающая характеристики крутящего момента двигателя, передаточных чисел трансмиссии, сопротивления качению, аэродинамического сопротивления и уклона дороги. Предложенная модель была реализована в виде вычислительного ядра, позволяющего выполнять моделирование во временной области и прогнозировать нестационарные режимы работы. Взаимодействие между характеристиками двигателя, конфигурацией трансмиссии и лобовым сопротивлением было проанализировано с помощью численного интегрирования управляющих уравнений. Полученные результаты позволили выявить ключевые факторы, определяющие баланс тяги, разгонной способности и энергетической эффективности автопоезда в различных условиях эксплуатации. Разработанная математическая и программная модель формирует методологическую основу для создания цифровых двойников, средств компьютерного моделирования и информационных систем прогнозирования, направленных на повышение топливной экономичности, эксплуатационной надежности и энергоэффективности сочлененных большегрузных транспортных средств.

**Ключевые слова:** тягово-динамические характеристики, транспортное моделирование, седельные тягачи, эффективность транспортных средств, высокая грузоподъемность, кинематическая схема привода.

### Литература

1. Малахов Д.Ю., Васильев А.В., Талдыкин Д.С. Моделирование динамики амфибийной шнекороторной платформы при движении по суше // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2025. Т. 15, № 3. С. 50-55. EDN UODKQLQ.
2. Акулов А.А., Ершов В.С., Калинин Д.А., Талдыкин Д.С. Управление процессами в промышленности и логистике: повышение эффективности и производительности // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления : сборник научных трудов, Москва, 17-20 июня 2024 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 1823-1829. EDN FXWJKV.
3. Захаров Н.С., Попцов В.В., Сапоженков Н.О. Корректирование периодичности обслуживания тормозной системы седельных тягачей // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 11. С. 55-57. EDN RNCUXW.
4. Шелелев С.Д., Клецов А.В., Герль К.Э. Эксплуатационные показатели седельных тягачей в междугороднем сообщении // Транспортное планирование и моделирование : сборник трудов международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26-27 мая 2016 г / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; Ассоциация транспортных инженеров. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. С. 82-85. EDN XXZYDV.
5. Карелина М.Ю., Подгорный А.В., Филатов В.В., Талдыкин Д.С. Актуальность разработки метода оценки эффективности автобусов по комплексу показателей технической и коммерческой эксплуатации // Транспортное дело России. 2024. № 3. С. 257-260. EDN UKQSLY.
6. Захаров Н.С., Немков М.В., Немков В.М. Методика выбора марочного состава седельных тягачей с использованием интегрального коэффициента // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 6. С. 88-95. DOI 10.25198/2077-7175-2021-6-88. EDN IYXXOD.
7. Карелина М.Ю., Терентьев А.В., Шаунов С.Д. Управление грузопотоками в транспортно-логистической системе на основе моделей бесконечной логики // Устойчивое развитие городского транспорта в Российской Федерации : Сборник научных статей, посвященных 95-летию юбилею Научно-исследовательского института автомобильного транспорта. М.: ООО Издательство "Экон-Информ", 2025. С. 67-84. EDN TADLOO.
8. Соловьев Н.В., Карелина М.Ю. Модель информационного критерия для оценки эффективности производства на различных видах транспорта // Техник транспорта: образование и практика. 2025. Т. 6, № 2. С. 176-181. DOI 10.46684/2687-1033.2025.2.176-181. EDN TYNGCO.
9. Поддубный В.И., Валекжанин А.И., Поддубная М.Л. Механико-математическая модель седельного тягача с двухосным полуприцепом // Ползуновский вестник. 2016. № 1. С. 43-47. EDN VVIJZF.
10. Карелина М.Ю., Ризаева Ю.Н., Баев В.В. и др. Повышение эффективности работы транспортно-технологической системы // Транспортное дело России. 2024. № 2. С. 192-196. EDN OBGNEP.
11. Маслов Н.А. Тяговый расчет и определение параметров вспомогательного привода ходового оборудования седельного тягача автопоезда // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 17-19 октября 2019 г. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 114-122. EDN VLAKRP.
12. Шевцов Ю.Д., Ниров А.Д., Журавлев М.М. и др. Создание экспериментальной базы данных с целью разработки интеллектуальных систем управления ДВС // Механика, оборудование, материалы и технологии : Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, Краснодар, 29-30 ноября 2022 г. Краснодар: ООО "ПринтТерра", 2022. С. 1014-1019. EDN OPPNWW.
13. Шевцов Ю.Д., Ниров А.Д., Дудник Л.Н., Журавлев М.М. Исследование теплового баланса ДВС для разработки интеллектуальных систем управления в двигателях транспортных средств // Электронный сетевой политехнический журнал "Научные труды КубГТУ". 2023. № 6. С. 63-77. EDN ACFSKJ.
14. Родичев А.Ю., Настепанин К.К., Родичева И.В., Васильев К.В. Интеллектуальная система диагностики состояния систем и агрегатов автомобиля // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 4-1(79). С. 3-12. DOI 10.33979/2073-7432-2022-1(79)-4-3-12. EDN DOGYBH.
15. Янкевич Н.С., Антонец А.И. Методика превентивной идентификации технического состояния автомобильной интеллектуальной транспортной системы // Вестник Белорусско-Российского университета. 2025. № 2(87). С. 69-79. DOI 10.24412/2077-8481-2025-2-69-79. EDN JTNUWP.
16. Булаев А.П., Кучелев Д.А., Яшина М.В. Динамические системы и математические модели трафика информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 3. С. 22-38.
17. Бугаев А.С., Таташев А.Г., Яшина М.В., Лавров О.С., Носов Е.А. Восстановление динамики транспортного потока на основе детерминированно-стохастической модели и данных с интеллектуально транспортными систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 10. С. 35-44.

### Информация об авторах:

**Ватин Николай Иванович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры "Детали машин и теория механизмов" ФГБОУ ВО МАДИ, Москва, Россия

**Терентьев Алексей Вячеславович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры "Детали машин и теория механизмов" ФГБОУ ВО МАДИ, Москва, Россия

**Подгорный Артем Велимирович**, аспирант, преподаватель кафедры "Детали машин и теория механизмов" ФГБОУ ВО МАДИ, Москва, Россия

**Талдыкин Дмитрий Сергеевич**, аспирант, ассистент кафедры кафедры "Детали машин и теория механизмов" ФГБОУ ВО МАДИ, Москва, Россия