

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", 2025

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 (РИНЦ)
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", 2025

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

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

Дулкейт 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

ИНФОРМАТИКА

- Кочкаров Р.А., Чиров Д.С., Тимошенко А.В., Казанцев А.М.**
Модель пространственно-распределенной информационной системы непрерывного мониторинга с предфрактальной динамической структурой в условиях воздействия дестабилизирующих факторов 4
- Карелина М.Ю., Филатов В.В.,
Нефёлов И.С., Талдыкин Д.С.**
Исследование отклонений действительной геометрии деталей, изготовленных по технологии 3D-печати, от номинальной геометрии их цифровых двойников 13

СВЯЗЬ

- Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Миронов Ю.Б.,
Терехин Д.Н., Бурдин А.В.**
Перспективы применения атмосферной оптической связи на крупных промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации 21

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

- Сивоконь В.П.**
Фактор космической пыли в реализации глобальных телекоммуникационных систем декаметрового диапазона 31
- Шустерман Ф.Д., Варламов О.В.**
Использование панельных антенн с уменьшенными рефлекторами и наклонной поляризацией на объектах УКВ радиовещания 39

ТРАНСПОРТ

- Клюев Р.В., Косцов А.В., Мартяхин Д.С.,
Кортиев А.Л., Берко А.А.**
К вопросу о расчете уровня удобства движения при создании интеллектуальных транспортных систем на городских дорогах скоростного движения 51

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

- Ватин Н.И., Акулов А.А., Суходоля А.В.,
Подгорный А.В., Логанов Н.В.**
Телематическая система мониторинга состояния узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники 59

CONTENT

COMPUTER SCIENCE

Kochkarov R.A., Chirov D.S., Timoshenko A.V., Kazantsev A.M.
Model of spatially distributed information system of continuous monitoring with pre-fractal dynamic structure under the influence of destabilizing factors 4

Karelina M.Yu., Filatov V.V., Nefyolov I.S., Taldykin D.S.
Study of deviations of the actual geometry of parts manufactured by 3D-printing technology from the nominal geometry of their digital counterparts 13

COMMUNICATIONS

Kazantsev S.Yu., Sapozhnikov M.V., Mironov Yu.B., Terekhin D.N., Burdin A.V.
Prospects for the application of atmospheric optical communications in large industrial and energy complexes of the Russian Federation 21

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Sivokon V.P.
The cosmic dust factor in the Implementation of global decameter range telecommunication systems 31

Shusterman F.D., Varlamov O.V.
Using panel antennas with reduced reflectors and slant polarization on VHF broadcasting objects 39

TRANSPORT

Klyuev R.V., Kostsov A.V., Martyakhin D.S., Kortiev A.L., Berko A.A.
Calculating the ease movement level with creating intelligent transport systems on high-speed urban roads 51

PUBLICATIONS IN ENGLISH

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Vatin N.I., Akulov A.A., Sukhodolya A.V., Podgorny A.V., Loganov N.V.
Telematic system for monitoring the condition of assemblies and units of agricultural machinery 59

T - C o m m

Telecommunications and transport

Volume 19. No. 1-2025

Release date: 25.01.2025

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

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА С ПРЕДФРАКТАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-4-12

Кочкаров Расул Ахматович,
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия, rasul_kochkarov@mail.ru

Чиров Денис Сергеевич,
Московский технический университет связи и информатики, Россия, Москва, d.s.chirov@mtuci.ru

Тимошенко Александр Васильевич,
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Россия, Москва, u567ku78@gmail.com

Казанцев Андрей Михайлович,
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Россия, Москва, kazantsev.andrei@gmail.com

Manuscript received 20 November 2024;
Accepted 30 December 2024

Ключевые слова: теоретико-графовая модель, структурно-функциональная устойчивость, пространственно-распределенная система мониторинга, информационные средства, оптимизационная задача

В статье рассмотрен вопрос обеспечения структурно-функциональной устойчивости и целостности пространственно-распределенной системы мониторинга в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Предложено концептуальное представление системы мониторинга в виде сети с многоуровневым информационным взаимодействием и определены особенности решаемой задачи. Для исследования вопроса структурно-функциональной устойчивости предложено использовать многоуровневый предфрактальный граф, динамически изменяющийся во времени и отражающий иерархическую структуру системы мониторинга. Такое представление позволит учитывать недетерминированность как весовых характеристик каналов связи, так и структуры рассматриваемой системы. Отмечена важность выделения промежутков времени между изменениями структуры системы мониторинга в связи с необходимостью разделения двух типов временных шкал: топологического времени, описывающего редкие, но значительные изменения в структуре графа, и операционного времени, в котором происходят частые и менее значительные изменения характеристик ребер и узлов графа. Предложена модель пространственно-распределенной системы мониторинга с предфрактальной динамической структурой, которая реализует задачу многокритериальной оптимизации с учётом приоритизации информационных каналов. При этом отмечено, что сочетание робастного подхода с двухвременными шкалами в многокритериальной оптимизации создаёт баланс между адаптивностью к быстрым изменениям и устойчивостью к крупным событиям. Это приводит к повышению общей эффективности и надёжности системы, позволяя ей эффективно функционировать в условиях сложной и изменчивой среды, характерной для систем с предфрактальной структурой. Согласованное управление на всех уровнях и временных шкалах: интеграция влияния разных уровней и временных шкал позволяет оптимизировать систему в целом, а не только её отдельные части.

Информация об авторах:

Кочкаров Расул Ахматович, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, доцент кафедры, к.э.н., доцент, Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-3186-3901

Чиров Денис Сергеевич, Московский технический университет связи и информатики, заведующий кафедрой, д.т.н., профессор, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-8509-4373

Тимошенко Александр Васильевич, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, профессор кафедры, д.т.н., профессор, Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-9791-142X

Казанцев Андрей Михайлович, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, доцент кафедры, к.т.н., Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-3608-8238

Для цитирования:

Кочкаров Р.А., Чиров Д.С., Тимошенко А.В., Казанцев А.М. Модель пространственно-распределенной информационной системы непрерывного мониторинга с предфрактальной динамической структурой в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 4-12.

For citation:

R. A. Kochkarov, D. S. Chirov, A. V. Timoshenko, A. M. Kazantsev, "Model of spatially distributed information system of continuous monitoring with pre-fractal dynamic structure under the influence of destabilizing factors," T-Comm, 2025, vol. 19, no.1, pp. 4-12. (in Russian)

Введение

Современные технологии связи и передачи данных позволяют формировать пространственно-распределенные системы информационного мониторинга (ПРИСМ) с большим количеством разнородных информационных средств (ИС) [1], позволяющих контролировать объекты различной природы на обширных территориях с разными климатическими и ландшафтными особенностями. Вопрос о развитии подобных систем в Российской Федерации стоит особенно остро и актуален ввиду значительной территориальной распределенности, в том числе в труднодоступных и климатически неблагоприятных условиях, в которых отсутствует развитая система коммуникации, что значительно затрудняет применение современных методов мониторинга и диагностирования. Особенности применения ПРИСМ является возможность задействовать устройства мониторинга как наземного, воздушного базирования, так и космических систем [2-7], что накладывает более высокие требования по решению информационно-емких задач, направленных на повышение производительности и повышения интенсивности передачи потоков информации, ее полноте и качеству.

Структура и параметры ПРИСМ, в виду воздействия как внутренних факторов (отсутствие электромагнитной доступности, отказ аппаратуры приема-передачи и т.п.), так и внешних дестабилизирующих факторов (преднамеренные помехи, физическое воздействие и др.) [8], постоянно меняются во времени, что соответствует формированию динамической сети [9-11].

В настоящее время при моделировании как функционирования, так и организации информационного взаимодействия сложной многоэлементной системы находят свое применение математический аппарат теории вероятности и графов, систем массового обслуживания и др. [12-17], что позволяет оценить структурно-функциональную устойчивость системы (сети информационного взаимодействия) в целом на основе связности и готовности каналов передачи данных. Однако, данные модели не в полной мере описывают способы реконфигурации сети в условиях приоритизации передаваемой информации, а также выполняются в отложенном режиме ввиду высокой вычислительной сложности используемых алгоритмов [18-22].

Поэтому актуальным является развитие научно-методического аппарата моделирования информационного взаимодействия элементов ПРИСМ в части повышения оперативности оценки структурно-функциональной устойчивости ПРИСМ.

Цель статьи – разработать модель пространственно-распределенной системы мониторинга, позволяющую производить оценку состояния системы в режиме реального времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов с учетом приоритизации информационных каналов на основе решения задачи обеспечения структурно-функциональной устойчивости и целостности.

Концептуальное представление ПРИСМ в виде сети с многоуровневым информационным взаимодействием

В рамках статьи ПРИСМ рассматривается в виде иерархической многоуровневой модели, представляющей собой физическую структуру сети передачи данных в виде средств мониторинга и каналов связи между ними, динамически

изменяющуюся во времени. Каждому средству ставится в соответствие телекоммуникационная аппаратура, которая обеспечивает передачу информационных потоков и команд управления в системе и характеризуется такими показателями как пропускная способность, надежность, производительность, задержки в передаче информации и т.д. Вариант функциональных взаимосвязей между средствами ПРИСМ показаны на рисунке 1.

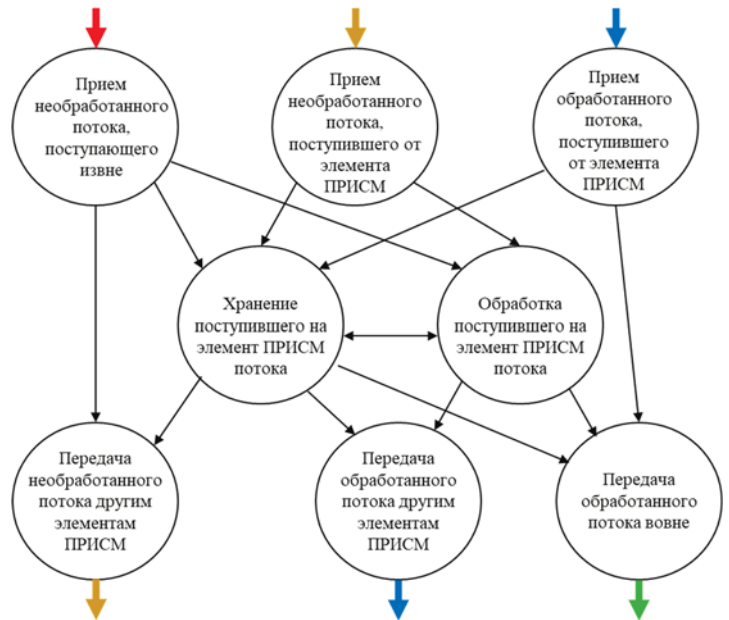


Рис. 1. Функциональные взаимосвязи между средствами ПРИСМ

В качестве примера изменения структурной динамики ПРИСМ (в упрощенном виде) представим сеть, в которой циркулирует два потока информации – управления и текущих данных мониторинга обстановки (рис. 2). Каждое средство системы характеризуется объемом хранимой информации $V_i, i = \overline{1,8}$, интенсивностью ее обработки $k_{i\sigma}$, где $i = \overline{1,8}$ – номер элемента сети, $\sigma \in [p, c]$ – тип информации (p – информация управления, c – данные мониторинга обстановки) и передачи $w_{ij\sigma}$, где $i = \overline{1,8}, j = \overline{1,8}, i \neq j$. Информация о текущей обстановке поступает на вход системы через средства 1 и 7, обрабатывается (средствами 1-4, 7 и 8 с интенсивностью $\varphi_{i\sigma}$), распределяется 5-м средством и доводится по потребителя информации (средство 6).

Схематичное представление структурной динамики ПРИСМ показано на рисунке 3.

Содержательная постановка задачи оценки состояния ПРИСМ в режиме реального времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов на предмет многоуровневого информационного взаимодействия с учетом приоритизации информационных каналов имеет следующие особенности [23]:

- если объем поступающей информации превышает возможности средств мониторинга по ее обработке, хранению и передаче, то происходит утеря неиспользуемых данных;

- суммарное время обработки и передачи информации ограничивается длительностью интервала постоянства структуры ($L = l \in L: 0 \leq l < +\infty$), которая варьируется в процессе функционирования ПРИСМ.

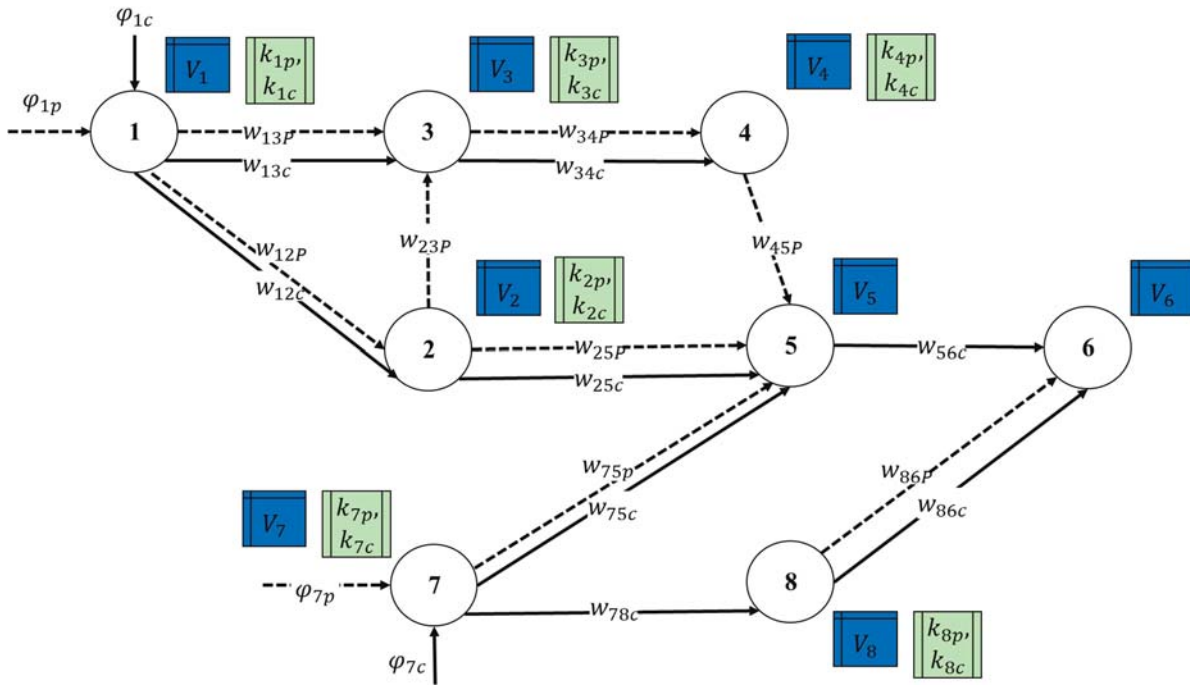


Рис. 2. Схематичное представление ПРИСМ в виде сети с двумя потоками разнородной информации

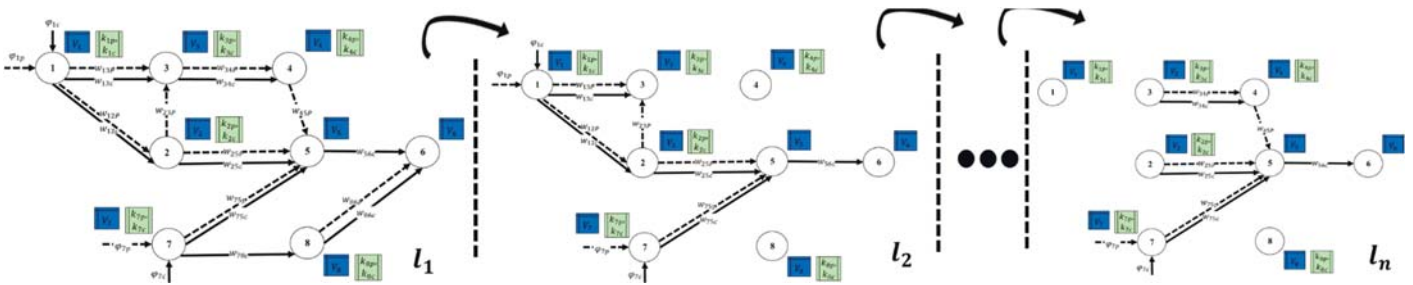


Рис. 3. Схематичное представление структурной динамики ПРИСМ

В целом задача сводится к математической постановке многокритериальной задачи на графах, которая включает множество допустимых решений, многокритериальную функцию, правила сравнения и выбора альтернативных решений. Однако решение классической многокритериальной задачи на графах не полностью охватывает цели, поставленные в рамках статьи – оперативная оценка структурно-функциональной устойчивости и целостности в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

В частности, для моделирования ПРИСМ с многоуровневым информационным взаимодействием в условиях дестабилизирующих факторов требуется учитывать следующие особенности:

- применение динамических графов со специальными свойствами самоподобия и неоднородности, что позволяет моделировать системы с высокой степенью структурной сложности и устойчивости динамически изменяющийся во времени [24-27];

- введение многовзвешенной модели ребер графа, где каждому ребру $e_{ij} \in G_F$ приписан вектор весов $w_{ij}(t)$, зависящий от множественных характеристик (пропускной способности, задержки, надежности и др.) изменяющихся во времени [28, 29].

Описание структуры ПРИСМ в виде динамического графа со свойствами самоподобия

Для описания структуры ПРИСМ в виде предфрактального динамического графа рассмотрим ориентированный граф. Это начальное представление позволяет эффективно моделировать направленное взаимодействие между средствами и учесть динамические изменения в структуре системы, что в дальнейшем обеспечивает возможность применения специальных свойств для более точного анализа и оценки ее состояния и функционирования.

Пусть система ПРИСМ описывается ориентированным графом $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество вершин, представляющих средства системы, оснащенные телекоммуникационным оборудованием (датчики, сервера, точки обработки данных и т.д.); $E = \{e_{ij}\} \subseteq V \times V$ – множество ребер (каналов связи) между средствами.

Каждое ребро $e_{ij} \in E$ взвешено вектором недетерминированных весов $w_{ij} = [w_{ij}^1, w_{ij}^2, \dots, w_{ij}^k]$ с коэффициентом подобия $\theta \in (0, 1)$: $0 < \theta < a/b$, где $a, b > 0$ – действительные числа и $a < b$, где каждый вес представляет одно из свойств канала связи:

- w_{ij}^1 – пропускная способность канала;
- w_{ij}^2 – задержка передачи данных;
- w_{ij}^3 – надёжность (вероятность отказа);
- w_{ij}^4 – стоимость использования канала (ресурсы, энергия и т.д.);
- ...
- w_{ij}^k – любое другое значимое свойство канала.

При этом недетерминированные веса могут быть представлены одним из трех видов неопределенности – интервальное число, нечеткое множество и временной ряд [30]:

- 1) интервальное число $w(e^{(l)}) = [w, \bar{w}] \subseteq [\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]$;
- 2) нечеткое множество $w(e^{(l)}) = \{(w_l, \mu(w_l)) | w_l \in [\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]\}$ с множеством значений $\{w_l\}$ и $\mu(w_l)$ – функцией принадлежности, заданной на отрезке $[0,1]$;
- 3) временной ряд $w(e^{(l)}) = w_l(e) = \langle w_l \rangle$, значения w_l которого лежат на отрезке $[\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]$.

На множестве допустимых решений $X = X(G) = \{x\}$: $x = (V_x, E_x)$, задается векторно-целевая функция, позволяющая производить оценку состояния ПРИСМ в условиях воздействия дестабилизирующих факторов:

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_M(x), \dots, F_{M+T}(x)) \quad (1)$$

в которой:

$$F_i(x) = op[\omega_i(e)] \rightarrow extr, i = 1, 2 \dots M \quad (2)$$

$$F_i(x) = op[\psi_i(v, e)] \rightarrow extr, i = M + 1, M + 2, \dots, M + T \quad (3)$$

Критерии $F_i(x)$, $i = \overline{1, M}$ из (2) являются весовыми, а критерии $F_i(x)$, $i = \overline{M + 1, M + T}$ из (3) – топологическими и задаются аналогично критериям ВЦФ (1). Решением задачи является элемент x^0 из X , в котором векторно-целевая функция F принимает предпочтительные значения по критериям $F_i(x)$, $i = \overline{1, M + T}$.

Структурная динамика ПРИСМ в следствие воздействия дестабилизирующих факторов представляется в виде ориентированного динамического графа $G = (V, E)$. Обозначим t дискретный момент времени, соответствующий топологическому моменту времени графа $G(t) = (V(t), E(t))$, тогда структура графа меняется под влиянием внешних факторов, таких как:

- добавление новых узлов или каналов ($V(t + 1) = V(t) \cup \{v_{new}\}, E(t + 1) = E(t) \cup \{e_{new}\}$);
- удаление узлов или каналов ($V(t + 1) = V(t) \setminus \{v_{lost}\}, E(t + 1) = E(t) \setminus \{e_{lost}\}$);
- изменение весов ребер в зависимости от нагрузки или внешних воздействий ($w_{ij}(t + 1) = f(w_{ij}(t))$, дестабилизирующие факторы)).

Изменения в структуре графа (например, появление или удаление узлов и ребер) чаще всего происходят в зависимости от:

- «крупных событий»: таких как сбои, атаки, изменения конфигурации системы или внешние факторы (например, географические изменения или инфраструктурные обновления).
- «инфраструктурные изменения»: изменения, связанные с добавлением новых узлов или каналов связи, выходом из строя оборудования или отключением определённых компонентов системы.

– «внешние дестабилизирующие факторы»: которые могут приводить к непредсказуемым изменениям в топологии сети [31].

Предфрактальные динамические графы обладают следующими специальными свойствами:

- кластеризация, где каждая вершина или подгруппа вершин может быть организована в предфрактальные структуры, что добавляет масштабируемость и устойчивость в сетевую архитектуру;
- иерархичность, граф ПРИСМ представляется в виде многоуровневой сети. На каждом уровне происходит самоподобное разделение на подгруппы узлов и каналов. Например, на самом верхнем уровне могут размещаться узлы-центры, которые координируют работу подгрупп на нижнем уровне [8].

С точки зрения предфрактального графа G_F его структура формируется с помощью рекурсивного добавления подграфов:

$G_F^{(0)} = G_0$ – базовая структура графа (например, простая решётка или дерево);

$G_F^{(k+1)} = f(G_F^{(k)})$ – предфрактальный граф на уровне $k + 1$, где функция f определяет процесс рекурсивного замещения вершин для формирования фрактальной структуры.

Таким образом, предфрактальный граф на уровне k содержит множество узлов и ребер, организованных по выбранному шаблону, и выражается в виде:

$$G_F^{(k)} = \bigcup_{i=1}^{N_k} G_F^{(k-1)} \oplus \{\text{соединяющие ребра}\},$$

где N_k – количество копий подграфов на уровне k , а оператор \oplus обозначает добавление новых ребер для соединения подграфов.

Как и в модели на ориентированном динамическом графе, для каждого ребра $e_{ij} \in G_F$ добавляется вектор весов w_{ij} . Однако, в предфрактальном графе веса могут зависеть от уровня (иерархии) ($w_{ij}^{(k)}$ – вес ребра на уровне k). Таким образом, для более высоких уровней присущи разные характеристики ребер, такие как более высокая пропускная способность или надежность, чем на нижних уровнях:

$$w_{ij}^{(k+1)} = f(w_{ij}^{(k)}),$$

где f – функция, определяющая зависимость весов от уровня (ранга иерархии). Например, на более высоких уровнях может быть меньшая задержка, так как узлы обеспечивают более эффективное распределение данных.

Так как граф динамический, то $G_F(t) = (V(t), E(t))$. Однако, в отличие от детерминированных изменений, интервал времени, в течение которого структура графа остаётся неизменной, может быть недетерминированным.

Важность выделения промежутков между изменениями структуры заключается также в необходимости разделения двух типов временных шкал:

- топологическое время (ΔT), которое описывает редкие, но значительные изменения в структуре графа;
- операционное время (Δt), в котором происходят частые и менее значительные изменения характеристик ребер и узлов (например, изменение пропускной способности или задержки).

Исходя из этого, наиболее подходящим методом решения задачи многокритериальной оптимизации является иерархическая многокритериальная оптимизация с недетерминированными весами, основанная на робастной оптимизации [32-36]. Этот метод позволяет:

- учитывать многокритериальность системы, где необходимо оптимизировать несколько показателей (задержка, надёжность, пропускная способность и т.д.);
- обрабатывать недетерминированность весов, вызванную изменениями характеристик рёбер и топологии сети [37-40];
- интегрировать обе временные шкалы, обеспечивая эффективную адаптацию на операционном уровне и устойчивость на топологическом уровне, обеспечивать робастность решений, то есть их устойчивость к наихудшим сценариям изменений.

На каждом уровне предфрактального графа структура связи может отличаться, как и характеристики рёбер, такие как пропускная способность, задержка, надёжность и стоимость. Следовательно, веса рёбер для каждого уровня k изменяются с учетом обеих временных шкал и неопределенности.

1. На операционном уровне:

$$w_{ij}^{(k)}(t + \Delta t) = f_{op}^k(w_{ij}^{(k)}(t), w_{ij}^{(k)}(t - \Delta t), \dots, w_{ij}^{(k)}(t - n\Delta t)) + \varepsilon_{ij}^{k,op}(t),$$

где f_{op}^k – функции временных рядов на уровне k для операционной шкалы, $\varepsilon_{ij}^{k,op}(t)$ – случайные возмущения, моделирующие неопределенность на операционной шкале.

2. На топологическом уровне:

$$w_{ij}^{(k)}(T + \Delta T) = f_{top}^k(w_{ij}^{(k)}(T), w_{ij}^{(k)}(T - \Delta T), \dots, w_{ij}^{(k)}(T - m\Delta T)) + \varepsilon_{ij}^{k,top}(T),$$

где f_{top}^k – функции временных рядов на уровне k для топологической шкалы, $\varepsilon_{ij}^{k,top}(T)$ – случайные возмущения, моделирующие неопределенность на топологической шкале.

Для каждого уровня k определим свою многокритериальную функцию $F^{(k)}$, учитывающую характеристики рёбер, временные изменения и неопределённость [41, 42]:

$$F^k(G_F^{(k)}(t, T)) = \left[\begin{array}{l} F_1^k((G_F^{(k)}(t, T))) \\ F_2^k((G_F^{(k)}(t, T))) \\ F_3^k((G_F^{(k)}(t, T))) \end{array} \right]$$

где $G_F^{(k)}(t, T)$ – отражает состояние системы на уровне k с учетом обеих временных шкал; F_1^k – пропускная способность, F_2^k – задержка, F_3^k – надёжность.

Агрегированная робастная многокритериальная функция оптимизационной задачи формулируется следующим образом:

$$\min_x \max_{w \in W} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \lambda_i^{(k)} F_i^k(x, w_{ij}^{(k)}(t + \Delta t), w_{ij}^{(k)}(T + \Delta T)) \right\} \quad (1)$$

где x – вектор решений (например, маршрутов); W – множество возможных значений весов, определяемое на основе неопределённости на обеих временных шкалах; $\lambda_i^{(k)}$ – весовые

коэффициенты для каждого критерия i на уровне k ; $w_{ij}^{(k)}(t + \Delta t)$ и $w_{ij}^{(k)}(T + \Delta T)$ – веса рёбер с учетом изменений на операционной и топологической временных шкалах соответственно.

В качестве примера оптимизации ПРИСМ на разных уровнях с учётом робастности и двух временных шкал, рассмотрим следующий сценарий. ПРИСМ включает три уровня системы связи:

Уровень 1: локальные узлы с высокой скоростью и низкой задержкой, которые подвержены частым операционным изменениям.

Уровень 2: региональные узлы с умеренной пропускной способностью и средней задержкой, подверженные как операционным, так и топологическим изменениям.

Уровень 3: центральные узлы с высокой надёжностью, но более высокой задержкой и стоимостью, где топологические изменения оказывают значительное влияние.

Моделирование весов с учётом двух временных шкал и робастности для уровня 2:

– операционные изменения:

$$w_{ij}^{(2)}(t + \Delta t) = 0.7w_{ij}^{(2)}(t) + 0.2w_{ij}^{(1)}(t) + \varepsilon_{ij}^{2,op}(t);$$

– топологические изменения:

$$w_{ij}^{(2)}(T + \Delta T) = 0.5w_{ij}^{(2)}(T) + 0.3w_{ij}^{(3)}(T) + \varepsilon_{ij}^{2,top}(T).$$

Выбор весовых коэффициентов $\lambda_i^{(k)}$ между уровнями играют важную роль в многокритериальной оптимизации, так как они определяют приоритеты для различных уровней и критериев. Например, если на уровне 1 важна минимизация задержки, то $\lambda_2^{(1)}$ будет иметь больший вес, тогда как на уровне 3 может быть приоритетной надёжность, что увеличит значение $\lambda_3^{(3)}$.

Решение задачи заключается в оптимизации решения x в формуле (1), которое минимизирует максимальное значение целевой функции при наихудших сценариях изменений весов на обеих временных шкалах. Формально выделяются три подкласса задач из naZ_t на предфрактальных графах, взвешенных недетерминированными весами (nd – «non-deterministic»): tsZ_t – взвешенных временными рядами (ts – «time-series»); fuZ_t – взвешенных нечеткими множествами (fu – «fuzzy»), inZ_t – взвешенных интервалами (in – «interval»). В дальнейшем предлагается исследование индивидуальных многокритериальных задач на многовзвешенном предфрактальном графе с недетерминированными весами, где для каждой задачи необходимо разработать алгоритмы поиска решений, определить вычислительные сложности алгоритмов и оценки критериев:

- задача размещения центра (naZ_1) – алгоритмы $in\alpha, fu\alpha, ts\alpha$;
- задача размещения медианы (naZ_2) – алгоритмы $in\beta, fu\beta, ts\beta$;
- задача выделения остовного леса (naZ_3) – алгоритмы $in\chi, fu\chi, ts\chi$;
- задача покрытия цепями (naZ_9) – класс алгоритмов $in\aleph, fu\aleph, ts\aleph$;
- задача ранговыми звездами (naZ_{10}) – алгоритмы $in\aleph^3, fu\aleph^3, ts\aleph^3$.

Интеграция робастного подхода и двух временных шкал, включая явный учёт топологической временной шкалы в многокритериальной оптимизации, позволяет эффективно управлять сложной динамикой системы с предфрактальной структурой. Это обеспечивает ряд важных преимуществ [43]:

- система быстро реагирует на частые и мелкие изменения в характеристиках рёбер, поддерживая высокую производительность и эффективность в условиях динамичной среды;
- надёжность системы сохраняется при редких, но существенных изменениях структуры сети, что критически важно для долгосрочной стабильности и непрерывности работы;
- повышается надёжность принимаемых решений за счёт моделирования наихудших сценариев и учета вариативности параметров, что позволяет минимизировать риски и нежелательные последствия изменений.

– интеграция влияния разных уровней и временных шкал способствует оптимизации системы в целом, а не только ее отдельных частей, обеспечивая гармоничную и эффективную работу всей структуры.

Таким образом, сочетание робастного подхода с двухвременными шкалами в многокритериальной оптимизации создаёт баланс между адаптивностью к быстрым изменениям и устойчивостью к крупным событиям. Это приводит к повышению общей эффективности и надёжности системы, позволяя ей эффективно функционировать в условиях сложной и изменчивой среды, характерной для систем с предфрактальной структурой. Согласованное управление на всех уровнях и временных шкалах: интеграция влияния разных уровней и временных шкал позволяет оптимизировать систему в целом, а не только её отдельные части.

Заключение

ПРИСМ с предфрактальной динамической структурой представляет собой инновационный подход к решению задач многокритериальной оптимизации, который обеспечивает более полное и эффективное решение благодаря нескольким ключевым преимуществам.

Во-первых, предфрактальная динамическая структура системы мониторинга позволяет создать гибкую и адаптивную архитектуру, которая может эволюционировать в ответ на изменения внешних условий и внутренних требований. Эта структура характеризуется многоуровневыми и взаимосвязанными элементами, что способствует лучшему управлению и координации различных аспектов мониторинга. Гибкость такой архитектуры важна для многокритериальной оптимизации, так как позволяет системе эффективно интегрировать и анализировать информацию по множеству критериев, которые могут меняться со временем.

Во-вторых, пространственная распределенность системы мониторинга обеспечивает эффективное распределение ресурсов и оперативный доступ к данным, что особенно важно для многокритериальной оптимизации. Распределенная архитектура позволяет системе эффективно обрабатывать и анализировать информацию, поступающую из различных источников и регионов, что способствует более точному и своевременному принятию решений. Приоритизация информационных каналов в такой системе позволяет сосредоточить внимание на наиболее критичных аспектах, улучшая общую эффективность мониторинга и оптимизации.

В-третьих, предфрактальная структура способствует лучшему управлению сложными взаимосвязями и взаимодействиями между различными элементами системы. Это позволяет системе мониторинга учитывать и моделировать сложные зависимости и влияния, что особенно важно в условиях многокритериальной оптимизации. Способность системы учитывать и анализировать сложные данные и их взаимосвязи способствует более глубокому пониманию и управлению многокритериальными задачами, что повышает точность и эффективность оптимизации.

В-четвертых, приоритизация информационных каналов в пространственно-распределенной системе позволяет эффективно управлять потоками данных, фокусируя ресурсы на наиболее важных и актуальных задачах. Это улучшает структурно-функциональную устойчивость системы, обеспечивая её способность адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям, сохраняя при этом высокую эффективность и надёжность.

Таким образом, модель ПРИСМ с предфрактальной динамической структурой представляет собой мощный инструмент для решения задач многокритериальной оптимизации. Её способность обеспечивать гибкость, эффективное распределение ресурсов, учет сложных взаимосвязей и приоритизацию информационных каналов позволяет существенно повысить структурно-функциональную устойчивость системы, что в свою очередь способствует более эффективному и точному решению оптимизационных задач в сложных и изменяющихся условиях.

Литература

1. Шевцов В.А., Казанцев А.М., Тимошенко А.В., Кочкаров Р.А., Прокопчина С.В. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 124-131. DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.019.
2. Ненашев В.А., Сенцов А.А. Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография. СПб: ГУАП, 2022. 191 с.
3. Зюзин А.В., Кныш М.В., Разиньков С.Н., Тимошенко А.В. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно-распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 3. С. 600-609.
4. Казанцев А.М., Кныш М.В., Макаров М.К. Выбор рационального состава группы радиоинформационных сенсоров пространственно-распределенной системы мониторинга // Труды МАИ: сетевой журн. 2022. №127. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-ratsionalnogo-sostava-gruppy-radioinformatsionnyh-sensorov-prostranstvenno-raspredelelennoy-sistemy-monitoringa>
5. Акиншин Р.Н., Шевченко Д.В., Чернышков А.И. Обобщенная модель пространственно-распределенной системы обработки информации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. №9-1. С. 32-38.
6. Чиров Д.С., Лобов Е.М. Выбор сигнально-кодированной конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №10. С. 21-28.

7. Чиров Д.С., Лобова Е.О. Компенсатор дисперсионных искажений широкополосных сигналов декаметрового диапазона, построенный на базе банка цифровых фильтров. Теория и эксперимент // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №4. С. 57-65.
8. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 337 с.
9. Масленников О.В., Некоркин В.И. Адаптивные динамические сети // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. Вып. 7. С. 745-756.
10. Kochkarov R., Kochkarov A. Introduction to the Class of Prefractal Graphs. Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 14. P. 2500. DOI 10.3390/math10142500.
11. Булаев А.П., Кучелев Д.А., Яшина М.В. Динамические системы и математические модели трафика информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №3. С. 22-38.
12. Рыжиков Ю.И. Численные методы теории очередей: учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 512 с.
13. Молев А.А., Тутов К.Д. Имитационная модель функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.1>
14. Chirov D.S., Kandaurova E.O. Identification of Available Trunking Communication Systems in Heterogeneous Cognitive Radio Access Networks // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Russia, 2019, pp. 1-7, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813969.
15. Kovtun V., Izonin I., Gregus M. Model of functioning of the centralized wireless information ecosystem focused on multimedia streaming. Egyptian Informatics Journal. 2022. Vol. 23. Iss. 4, pp. 89-96, <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.06.009>.
16. Кругликов С.В., Филиппенко И.В., Зализко А.Ю., Бекиш А.Р. Модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы // Информатика. 2019. Т. 16. № 1. С. 58-74.
17. Borodin V.V., Kletskov D.A., Timoshenko A.V., Shevtsov V.A. Multi-Agent Dynamic Model of the Multi-Criteria Information Interaction of Structural Elements of a Self-Organizing Data Transmission Network of a Ground-Air Monitoring System. J. Comput. Syst. Sci. Int. 2022. Vol. 61, pp. 990-1002 <https://doi.org/10.1134/S1064230722060053>
18. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. №4 (12). С. 69-79.
19. Voevodin V. A model for assessing the functional stability of information infrastructure elements for conditions of exposure to multiple computer attacks. Informatics and Automation. 2023. Iss. 22. Vol. 3, pp. 691-715.
20. Aziz T., Lin Z., Waseem M., Liu S. Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience // Int Trans Electr Energ Syst. 2021. Vol. 31. Iss. 3. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12704>
21. Pereira E.C., Barbosa C.H.N.R., Vasconcelos J.A. Distribution Network Reconfiguration Using Iterative Branch Exchange and Clustering Technique. Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 5. 20 p. <https://doi.org/10.3390/en16052395>
22. Abu-Elanien A.E.B., Salama M.M.A., Shaban K.B. Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57. Iss. 4. Pp. 3959-3967, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.011>
23. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Москвин Б.В., Григорьев К.Л. Модифицированная модель гибкого перераспределения технологических операций информационного взаимодействия // Изв. Вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 25-30.
24. Айзерман М.А., Гусев Л.А., Петров С.В., Смирнова И.М., Тененбаум Л.А. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики) // Исследования по теории структур. М.: Наука, 1988. С. 5-76.
25. Кочкаров А.А., Салгагаров М.Б., Кочкаров Р.А. Моделирование разрушения сложных систем с ациклической структурой // Управление большими системами: сборник трудов. 2007. № 17. С. 103-120.
26. Chen L., Wang L., Zeng C., Liu H., Chen J. DHGEEP: A Dynamic Heterogeneous Graph-Embedding Method for Evolutionary Prediction. Mathematics. 2022. Vol. 10. Iss. 22. <https://doi.org/10.3390/math10224193>
27. Zang X., Tang B. Self-supervised Dynamic Graph Embedding with evolutionary neighborhood and community. Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 228. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120409>.
28. Форд Л., Фалкерсон Д. Потoki в сетях. М.: Мир, 1966. 276 с.
29. Wang Y., Yuan Y., Ma Y., Wang G. Time-Dependent Graphs: Definitions, Applications, and Algorithms. Data Science and Engineering. 2019. Vol. 4. Pp. 352-366. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41019-019-00105-0>
30. Кочкаров Р.А., Кочкаров А.А., Казанцев А.М. Многокритериальная задача сетевого планирования разработки сложной технической системы // Хроноэкономика. 2019. № 1(14). С. 10-14.
31. Касьянов В.Н., Касьянова Е.В. Модель атрибутированных иерархических графов с портами для визуализации сложно структурированной информации // Преподавание информационных технологий в российской Федерации: Сборник научных трудов Двадцать первой открытой Всероссийской конференции, Нижний Новгород, 18-19 мая 2023 года. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2023. 10 С.
32. Kunjur A., Krishnamurty S. A robust multi-criteria optimization approach. Mechanism and Machine Theory. 1997. Vol. 32. Iss. 7, pp. 797-810. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(97\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(97)00007-4).
33. Nejadsefyi O., Geijselaers H.J.M., van den Boogaard A.H. Robust optimization based on analytical evaluation of uncertainty propagation. Engineering Optimization. 2018. Vol. 51 No. 9, pp. 1581-1603. DOI: 10.1080/0305215X.2018.1536752.
34. Немировский А.С. Основные концепции и результаты робастной оптимизации в применении к линейному программированию с неточными данными // Cloud of science. 2014. Т. 1. № 2. С. 180-190.
35. Belenky A., Fedin G., Kornhauser A. Robust mathematical models associated with negotiating financial investments in large-scale transportation projects. IFORS 2017 Technical Program. 2017. P. 115.
36. Пролубников А.В. Подходы к решению задач дискретной оптимизации с интервальной целевой функцией // Вычислительные технологии. 2021, Т. 26. № 6. С. 82-109. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.6.007
37. Прокофьев В.С., Малышев В.А. Нечеткие алгоритмы планирования распределения ресурсов системы управления военного назначения // Вестник Воронежского университета высоких технологий 2008. № 3. С. 50-53.
38. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3, pp. 338 353.
39. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
40. Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей: последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. 408 с.
41. Дорожко И.В., Осипов Н.А. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации // Труды СПИИРАН. 2012. № 1(20). С. 165-185,
42. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 144 с.
43. Сирота А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. М.: Техносфера, 2006. 280 с.

MODEL OF SPATIALLY DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM OF CONTINUOUS MONITORING WITH PRE-FRACTAL DYNAMIC STRUCTURE UNDER THE INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS

Rasul A. Kochkarov, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, rasul_kochkarov@mail.ru

Denis S. Chirov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, d.s.chirov@mtuci.ru

Alexander V. Timoshenko, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, u567ku78@gmail.com

Andrey M. Kazantsev, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, kazantsev.andrei@gmail.com

Abstract

The article considers the issue of ensuring structural and functional stability and integrity of spatially distributed monitoring system under the influence of destabilizing factors. The conceptual representation of the monitoring system in the form of a network with multilevel information interaction is proposed and the features of the problem to be solved are determined. To investigate the issue of structural and functional stability, it is proposed to use a multilevel pre-fractional graph, dynamically changing in time and reflecting the hierarchical structure of the monitoring system. This representation will allow to take into account the non-determinism of both the weight characteristics of communication channels and the structure of the system under consideration. The importance of distinguishing time intervals between changes in the structure of the monitoring system is noted due to the need to separate two types of time scales: topological time, which describes rare but significant changes in the graph structure, and operational time, in which there are frequent and less significant changes in the characteristics of edges and nodes of the graph. A model of a spatially distributed monitoring system with a pre-fractional dynamic structure is proposed, which implements the problem of multi-criteria optimization taking into account the prioritization of information channels. It is noted that the combination of robust approach with two-temporal scales in multicriteria optimization creates a balance between adaptability to rapid changes and robustness to large events. This leads to improved overall system performance and reliability, allowing the system to function effectively in the complex and volatile environment characteristic of pre-fractal systems. Coordinated management across levels and time scales: integrating the influence of different levels and time scales allows optimizing the system as a whole, not just its individual parts.

Keywords: graph-theoretic model, structural and functional stability, spatially distributed monitoring system, information means, optimization problem

References

- [1] V. A. Shevtsov, A. M. Kazantsev, A. V. Timoshenko, R. A. Kochkarov, S. V. Prokopchina, "Indicator of structural efficiency of information interaction management in heterogeneous data transmission network of spatially distributed monitoring system", *Bulletin of Voronezh State Technical University* (English translation of *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), vol. 20, no. 2, 2024, pp. 124-131 (In Russian)
- [2] A. V. Zyuzin, M. V. Knysh, S. N. Razinkov, A. V. Timoshenko, "Justification of the ways of construction and assessment of the efficiency of application of a spatially distributed system of information sensors for monitoring the situation," *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, vol. 22, no. 3, pp. 600-609, 2022. DOI: [doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609) (In Russian)
- [3] A. M. Kazantsev, M. V. Knysh, M. K. Makarov, "Selection of a rational composition of a group of radio information sensors of a spatially distributed monitoring system," *Proceedings of MAI*, no. 127, 2022. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-ratsionalnogo-sostava-gruppy-radioinformatsionnyh-sensirov-prostranstvenno-raspredeleynoy-sistemy-monitoringa> (In Russian)
- [4] V. A. Nenashev, A. A. Sentsov, "Spatially distributed systems of radar and optical monitoring: monograph," St. Petersburg: GUAP, 2022, 191 p. (In Russian)
- [5] R. N. Akinshin, D. V. Shevchenko, A. I. Chernyshkov, "Generalized model of the spatially distributed information processing system," *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, no. 9-1, pp. 32-38, 2017 (In Russian)
- [6] 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. (in Russian)
- [7] D. S. Chirov, E. O. Lobova, "Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approbation," *T-Comm*, 2020, vol. 14, no.4, pp. 57-65. (in Russian)
- [8] S. I. Makarenko, "Models of communication system under conditions of deliberate destabilizing influences and reconnaissance: a monograph," St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii, 2020, 337 p. (In Russian)
- [9] O. V. Maslennikov, V. I. Nekorkin, "Adaptive dynamical networks," vol. 187, no. 7, pp. 745-756, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3367/ufne.2016.10.037902> (In Russian)
- [10] R. Kochkarov, A. Kochkarov, "Introduction to the Class of Prefractal Graphs," *Mathematics*, vol. 10, no. 14, p. 2500, 2022. DOI: [10.3390/math10142500](https://doi.org/10.3390/math10142500).
- [11] A. P. Buslaev, D. A. Kucheleev, M. V. Yashina, "Dynamical systems and mathematical models of information traffic," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.3, pp. 22-38. (in Russian)
- [12] Yu. I. Ryzhikov, "Numerical methods of queueing theory: textbook," St. Petersburg: Lan, 2019, 512 p. (In Russian)
- [13] A. A. Molev, K. D. Titov, "Simulation model of ultra-wideband radio communication system under the influence of interference," *Journal of Radio Electronics* (English translation of *Zhurnal Radioelektroniki*), no. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.1> (In Russian)
- [14] D. S. Chirov, E. O. Kandaurova, "Identification of Available Trunking Communication Systems in Heterogeneous Cognitive Radio Access Networks," *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Russia, 2019, pp. 1-7, DOI: [10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813969](https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813969).
- [15] V. Kovtun, I. Izonin, M. Gregus, "Model of functioning of the centralized wireless information ecosystem focused on multimedia streaming," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 89-96, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.06.009>.
- [16] S. V. Kruglikov, I. V. Filipchenko, A. Y. Zalizko, A. R. Bekish, "A model of a wireless data network of dynamic information-controlling system," *Informatics*, vol. 16, no. 1, pp. 58-74 (In Russian)
- [17] V. V. Borodin, D. A. Kletskov, A. V. Timoshenko, V. A. Shevtsov, "Multi-Agent Dynamic Model of the Multi-Criteria Information Interaction of Structural Elements of a Self-Organizing Data Transmission Network of a Ground-Air Monitoring System," *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, vol. 61, pp. 990-1002, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064230722060053>
- [18] R. L. Mikhailov, S. I. Makarenko, "Estimation of stability of a communication network under the influence of destabilizing factors," *Radio engineering and telecommunication systems* (English translation of *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*), no. 4 (12), pp. 69-79, 2013 (In Russian)

- [19] V. Voevodin, "A model for assessing the functional stability of information infrastructure elements for conditions of exposure to multiple computer attacks," *Informatics and Automation*, no. 22, vol. 3, pp. 691-715, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15622/ia.22.3.8> (In Russian)
- [20] T. Aziz, Z. Lin, M. Waseem, S. Liu, "Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience," *Int Trans Electr Energ Syst.*, vol. 31, no. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12704>
- [21] E. C. Pereira, C. H. N. R. Barbosa, J. A. Vasconcelos, "Distribution Network Reconfiguration Using Iterative Branch Exchange and Clustering Technique," *Energies*, vol. 16, no. 5, 20 p, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052395>
- [22] A. N. Pavlov, D. A. Pavlov, B. V. Moskvina, K. L. Grigoriev, "Modified model of flexible redistribution of technological operations of information interaction," *Journal of Instrument Engineering* (English translation of *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*), vol. 57, no. 11, pp. 25-30, 2014 (In Russian)
- [23] A. E. B. Abu-Elanien, M. M. A. Salama, K. B. Shaban, "Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 3959-3967, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.011>
- [24] M. A. Aizerman, L. A. Gusev, S. V. Petrov, I. M. Smirnova, L. A. Tenenbaum, "Dynamic approach to the analysis of structures described by graphs (basics of graph dynamics)," *Research on structure theory* (English translation of *Issledovaniya po teorii struktur*), Moscow: Science, 1988, pp. 7-76
- [25] A. A. Kochkarov, M. B. Salpagarov, R. A. Kochkarov, "Modeling of destruction of complex systems with acyclic structure," *Large-Scale Systems Control*, no. 17, pp. 103-120, 2007 (In Russian)
- [26] L. Chen, L. Wang, C. Zeng, H. Liu, J. Chen, "DHGEEP: A Dynamic Heterogeneous Graph-Embedding Method for Evolutionary Prediction," *Mathematics*, vol. 10, no. 22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10224193>
- [27] X. Zang, B. Tan, "Self-supervised Dynamic Graph Embedding with evolutionary neighborhood and community," *Expert Systems with Applications*. vol. 228, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120409>.
- [28] R. A. Kochkarov, A. A. Kochkarov, A. M. Kazantsev, "Multicriteria problem of network planning of development of a complex technical system," *HronoEconomics*, no. 1(14), pp. 10-14, 2019 (In Russian)
- [29] L. Ford, D. Falkerson, "Flows in networks," Moscow: Mir, 1966, 276 p. (In Russian)
- [30] Y. Wang, Y. Yuan, Y. Ma, G. Wang, "Time-Dependent Graphs: Definitions, Applications, and Algorithms," *Data Science and Engineering*, vol. 4, pp. 352-366, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41019-019-00105-0>
- [31] V. N. Kasyanov, E. V. Kasyanova, "Model of Attributed Hierarchical Graphs with Ports for Visualization of Complexly Structured Information," *Teaching Information Technology in the Russian Federation: Collection of scientific papers of the Twenty-first Open All-Russian Conference*, Nizhny Novgorod, May 18-19, 2023. Nizhny Novgorod: Publishing house of N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 10 p., 2023 (In Russian)
- [32] A. Kunjur, S. Krishnamurthy, "A robust multi-criteria optimization approach," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 32, no. 7, pp. 797-810, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(97\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(97)00007-4).
- [33] O. Nejadseyfi, H. J. M. Geijselaers, A.H. van den Boogaard, "Robust optimization based on analytical evaluation of uncertainty propagation," *Engineering Optimization*, vol. 51, no. 9, pp. 1581-1603, 2018. DOI: 10.1080/0305215X.2018.1536752.
- [34] A. S. Nemirovskiy, "Basic concepts and results of robust optimization in application to linear programming with imprecise data," *Cloud of science*, vol. 1, no. 2, pp. 180-190, 2014 (In Russian)
- [35] A. Belenky, G. Fedin, A. Kornhauser, "Robust mathematical models associated with negotiating financial investments in large-scale transportation projects," *IFORS 2017 Technical Program*, 115 p., 2017.
- [36] A. V. Prolubnikov, "Approaches to discrete optimization problems with interval objective function," *Computational technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 82-109, 2021. (In Russian)
- [37] V. S. Prokofiev, V. A. Malyshev, "Fuzzy algorithms for planning the distribution of military control system resources," *Scientific Journal Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*, no. 3, pp. 50-53, 2008 (In Russian)
- [38] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [39] A. Kofman, "Introduction to the theory of fuzzy sets," Moscow: Radio and Communications, 1982, 432 p. (In Russian)
- [40] R. R. Yager, "Fuzzy sets and the theory of possibilities: Recent achievements," Moscow: Radio and Communications, 1986, 408 p. (In Russian)
- [41] I. Dorozhko, N. Osipov, "Technique of synthesis of optimal strategies for diagnostics of the automated control systems of complex technical objects with the use of aprioristic information," *SPIIRAS Proceedings*, vol. 1(20), pp. 165-185, 2012. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.20.9>
- [42] V. D. Nogin, "Decision-making in a multi-criteria environment: a quantitative approach," Moscow: FIZMATLIT, 2002, 144 p. (In Russian)
- [43] A. A. Sirota, "Computer modeling and efficiency assessment of complex systems," Moscow: Technosphaera, 2006, 280 p. (In Russian)

Information about authors:

Rasul A. Kochkarov, Financial University under the Government of the Russian Federation, Associate Professor of the Department, Associate Professor, PhD in Economics, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0003-3186-3901

Denis S. Chirov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-8509-4373

Alexander V. Timoshenko, Financial University under the Government of the Russian Federation, Professor of the Department, Professor, Doctor of Technical Sciences, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0002-9791-142X

Andrey M. Kazantsev, Financial University under the Government of the Russian Federation, Associate Professor of the Department, Associate Professor, PhD (technical sciences), Moscow, Russia. ORCID: 0000-0003-3608-8238

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ, ОТ НОМИНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ИХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-13-20

Карелина Мария Юрьевна,
Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия;
Государственный университет управления, Москва, Россия,
karelinamu@mail.ru

Manuscript received 10 November 2024;
Accepted 15 December 2024

Филатов Владимир Викторович,
Государственный университет управления, Москва, Россия,
2vfilatov@gmail.com

Нефёлов Илья Сергеевич,
Государственный университет управления, Москва, Россия,
iljanefelov@yandex.ru

Талдыкин Дмитрий Сергеевич,
Государственный университет управления, Москва, Россия;
Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, dima.dima.taldykin@mail.ru

Ключевые слова: 3D-печать, контроль качества, пространственная геометрия, отклонения, программное обеспечение

В последнее время аддитивные технологии активно внедряются в различные производственные процессы, включая сельское хозяйство и производство машин и оборудования. Несмотря на непрерывное совершенствование оборудования для 3D-печати, проблема точности напечатанных изделий остается актуальной. В условиях повышенных требований к надежности аддитивных изделий, пространственные отклонения, возникающие в процессе 3D-печати, оказывают значительное влияние на качество конечного продукта. Основной целью данного исследования было выявление и анализ отклонений пространственной геометрии между напечатанными изделиями и их электронной 3D-моделью. В исследовании применялись методы измерения геометрических размеров, включая использование 3D-сканирования напечатанных деталей и их повторное изготовление по технологии FDM (Fused Deposition Modeling). В качестве объекта исследования была выбрана направляющая часть турбинного насоса. Были выявлены типовые отклонения пространственной геометрии изделий, напечатанных по данной технологии, основными причинами которых являются механические неисправности оборудования и нарушения в настройках 3D-принтеров. На основе полученных данных были разработаны рекомендации по оптимизации процессов 3D-печати, направленные на улучшение качества производимых деталей. Применение этих рекомендаций, в том числе с использованием программного обеспечения для контроля и настройки печати, позволит не только повысить качество печатных изделий, но и сократить материалоемкость при производстве сложных деталей, что будет способствовать дальнейшему развитию аддитивных технологий.

Информация об авторах:

Карелина Мария Юрьевна, д.т.н., д.п.н., профессор, Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия; проректор, Государственный университет управления, Москва, Россия

Филатов Владимир Викторович, к.т.н., доцент, Ведущий научный сотрудник Лаборатории реверсивного инжиниринга, Государственный университет управления, Москва, Россия

Нефёлов Илья Сергеевич, к.т.н., доцент, научный сотрудник Лаборатории реверсивного инжиниринга, Государственный университет управления, Москва, Россия

Талдыкин Дмитрий Сергеевич, техник Лаборатории реверсивного инжиниринга, Государственный университет управления, Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Для цитирования:

Карелина М.Ю., Филатов В.В., Нефёлов И.С., Талдыкин Д.С. Исследование отклонений действительной геометрии деталей, изготовленных по технологии 3D-печати, от номинальной геометрии их цифровых двойников // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 13-20.

For citation:

M. Yu. Karelina, V. V. Filatov, I. S. Nefyolov, D. S. Taldykin, "Study of deviations of the actual geometry of parts manufactured by 3D-printing technology from the nominal geometry of their digital counterparts," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.1, pp. 13-20. (in Russian)

Введение

Одними из основных задач, которые стоят перед современной промышленностью является рациональное использование ресурсов, повышение эффективности производственных процессов, а также решение ряда социальных и экономических проблем. Внедрение аддитивных технологий в современные производственные процессы позволяет достичь необходимого результата [1, 4]. 3D-печать позволяет существенно сократить затраты на транспортировку и закупку запасных частей, а также снизить простой оборудования в ожидании поставки деталей. Это особенно важно для предприятий, которые испытывают нехватку финансовых ресурсов [9, 12].

Применение аддитивных технологий оправдано при создании уникальных прототипов и функциональных изделий, когда детали, изготовленные традиционными технологиями, не могут соответствовать всем предъявляемым эксплуатационным требованиям [3, 6, 7]. 3D-печать дает возможность изготавливать прототипы в короткие сроки и оперативно учитывать необходимые изменения в конструкции [17]. Несмотря на распространенное заблуждение о том, что напечатанные детали не требуют механической обработки, методы 3D-печати позволяют изготавливать изделия с минимальными припусками, таким образом способствуя более эффективному управлению ресурсами [19].

Технология 3D-печати FDM является одной из самых распространенных аддитивных технологий. Это стало возможно благодаря простоте эксплуатации и доступности оборудования. Однако, как и в любой технологии, в FDM есть свои технологические особенности, которые приводят к возникновению различных отклонений от изначальной 3D-модели изделия [2]. Поэтому, несмотря на ее преимущества, необходимо внимательно относиться к вопросу точности печати изготавливаемых изделий [8, 10, 18].

Функциональные характеристики напрямую зависят от точности геометрии напечатанных деталей [11]. Недостаточная точность 3D-печати приводит к несоответствию действительных размеров детали с номинальными размерами 3D-модели, что в свою очередь вызывает проблемы на этапе сборки, а также увеличивает припуски на механическую обработку или наоборот, снижает прочность и долговечность готовых изделий в том случае, если величины припусков меньше необходимых значений для устранения дефектных слоев материала [15, 16]. Даже незначительные отклонения могут привести к значительным затратам на их устранение, а в некоторых случаях могут являться причинами возникновения критических отказов в работе узлов, в которых установлены напечатанные детали [13, 14].

Анализ отклонений пространственной геометрии является одним из ключевых моментов в оптимизации производственных процессов. Он позволяет выявить систематические ошибки и определить факторы, влияющие на точность изготовления. На основе полученных результатов могут быть разработаны рекомендации по выбору режимов печати, наладке оборудования. В итоге все эти действия приводят к повышению качества конечной продукции и снижению затрат на устранение дефектов. Как следствие, эти мероприятия способствуют ускорению интеграции в промышленные процессы, а также происходит коррекция направления будущих исследований в области 3D-печати [5].

Таким образом, внедрение аддитивных технологий, в т.ч. в сельскохозяйственный сектор, требует комплексного подхода по решению проблем с точностью для обеспечения наибольшего экономического и социального эффектов.

Однако, несмотря на огромную значимость проведение подобного рода исследований для изделий со сложной и уникальной пространственной геометрией весьма затруднено в силу необходимости использования специализированного оборудования и программного обеспечения. Поэтому данная работа направлена на определение общих рекомендаций по выбору режимов 3D-печати и настройке оборудования с целью снижения отклонений пространственной геометрии печатаемых изделий.

Материалы и методы

Исследование отклонений пространственной геометрии напечатанных изделий от исходной 3D-модели включает в себя несколько основных этапов.

На первом этапе выполняется выбор объекта исследования среди многообразия вариантов 3D-моделей. На втором этапе выполняется подбор оборудования и материалов для 3D-печати. Следующим этапом является назначение параметров 3D-печати для изготовления выбранной детали с наиболее оптимальным соотношением цена/качество. Для выполнения анализа отклонений будет применяться высокоточный 3D-сканер RangeVision Pro и специализированное программное обеспечение 3D Systems Control X.

Для проведения комплексного анализа отклонений программное обеспечение 3D Systems Control X предоставляет инструменты, предназначенные для метрологического анализа, обеспечивая точное выравнивание и сравнение между отсканированной в 3D-формате моделью и исходным файлом САПР. Данное программное обеспечение, использующее передовые алгоритмы и методики анализа, позволяет проводить оценку геометрических отклонений в печатных деталях с высоким разрешением.

1. Выравнивание данных и первоначальное сравнение: 3D Systems Control X начинает с импорта отсканированных данных и CAD-модели, применяя жесткое или наиболее подходящее выравнивание. Этот процесс выравнивания имеет ключевое значение, поскольку сводит к минимуму вероятность ошибок и обеспечивает точную привязку сравнительных показателей к исходной модели. Сложные варианты выравнивания, такие как выравнивание по базовым параметрам, по объектам и по поверхности, обеспечивают гибкость при адаптации к конкретной геометрии или особенностям, повышая точность анализа.

2. Инструменты для измерения отклонений: программное обеспечение включает специализированные функции для расчета отклонений в пространственной геометрии, включая проверку допусков профиля, анализ допусков формы и измерение расстояния между кромками. Используя методы цветового отображения, отклонения отображаются на поверхности, что позволяет быстро определить области, в которых изготовленная модель отличается от проектных спецификаций. Установив определенные пороговые значения допусков, программное обеспечение может автоматически предупреждать о несоответствующих характеристиках, что облегчает оценку

в режиме реального времени и корректировку управления процессом.

3. Расширенные функции анализа: Control X поддерживает ряд функций детального контроля, включая анализ GD&T (определение геометрических размеров и допусков) и сравнение поперечных сечений. Эти функции позволяют тщательно исследовать сложную геометрию деталей, гарантируя точное измерение и выявление даже незначительных отклонений. Кроме того, функции автоматизированной отчетности программного обеспечения позволяют создавать подробные отчеты с числовыми данными и наглядными пособиями, что делает его подходящим для приложений, требующих тщательного документирования и прослеживаемости, таких как обеспечение качества при прецизионном производстве.

4. Интеграция и оптимизация данных: результаты работы Control X могут быть экспортированы в различные форматы, что позволяет интегрировать их в более крупные конвейеры обработки данных. Эта функциональность особенно полезна для итеративных процессов проектирования и производства, где непрерывная обратная связь между этапами проектирования, печати и анализа может значительно улучшить общее качество продукции и снизить затраты, связанные с геометрическими неточностями.

В сочетании с 3D-сканером RangeVision Pro программное обеспечение Control X обеспечивает высокоточное решение для проверки соответствия объектов, напечатанных на 3D-принтере. Такое сочетание гарантирует, что любые отклонения в конечном продукте могут быть быстро выявлены, задокументированы и устранены, что обеспечивает строгий контроль качества и соблюдение заранее установленных допусков.

Результаты и обсуждение

Для проведения анализа отклонений пространственной геометрии напечатанных изделий от 3D-модели необходимо выбрать изделие, которое в совокупности обладает набором различных геометрических форм разной сложности. Например, цилиндрическими внутренними и внешними поверхностями, коническими поверхностями, плоскими и криволинейными поверхностями.

В качестве объекта исследования была выбрана направляющая часть турбинного насоса (рис. 1), которая соответствует вышеуказанным критериям отбора.

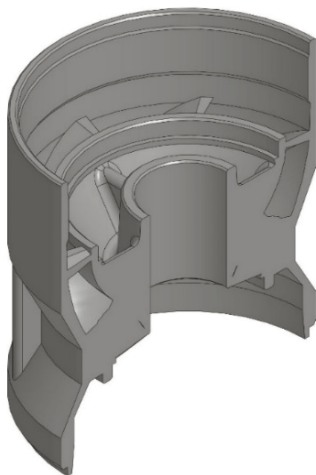


Рис. 1. Направляющая часть турбинного насоса в сечении

Направляющая часть служит для направления потока жидкости и обеспечивает оптимальные условия для уменьшения скорости потока и увеличения давления жидкости. К её основным конструктивным элементам относят: ступичную часть, направляющие лопатки и наружную часть корпуса. 3D-модель детали была получена путем проведения реверс-инжиниринга.

Для подготовки задания на 3D-печать необходимо файл твердотельной модели из формата САD-программы экспортировать в формат полигональной модели STL. Процесс экспорта сопровождается выбором линейных и угловых отклонений полигональной модели. На этом этапе впервые происходит снижение точности будущей детали по сравнению с твердотельной моделью, формы которой описываются математически. Для экспорта были выбраны значения допустимых отклонений в 0,01 мм.

На первом этапе исследования осуществлялась 3D-печать полученной модели по технологии FDM с режимами, приведенными в таблице 1. На рисунке 2 приведен внешний вид напечатанной детали.

Таблица 1

Режимы 3D-печати направляющей части турбинного насоса

Параметр	Значение
Материал	PETg+12%GF
Температура экструзии, °C	250
Диаметр сопла экструдера, мм	0,5
Коэффициент подачи	1,03
Процент заполнения, %	100
Высота слоя, мм	0,15
Скорость печати, мм/с	30



Рис. 2. Направляющая часть турбинного насоса, изготовленная по технологии FDM

Выбор в качестве материала детали модифицированного полиэтилен терефталат гликоля (PETg) с добавлением 12% рубленного стекловолокна, обуславливается высокой химической стойкостью материала к воздействию различных агрессивных сред, а также великолепной межслоевой адгезией. Рубленное стекловолокно в составе материала повышает его прочностные характеристики, а также теплостойкость изделия, что наиболее важно при работе в условиях повышенных температур.

Температура экструзии назначена с учетом рекомендаций производителя филамента. Выбранное значение позволяет предотвратить возникновение засора сопла и в то же время обеспечивает достаточную текучесть материала, что позволяет получать прочные межслоевые связи.

Размер поперечного сечения твердосплавного сопла, а также выбранная высота слоя обеспечивают требуемый баланс между производительностью и детализацией. Наилучшую детализацию возможно получать на наименьших значениях этих параметров (порядка 0,1 мм), но это значительно повысит длительность 3D-печати. Наличие в составе материала для печати армирующего материала (рубленного стекловолокна) может приводить к засору сопла на меньших его диаметрах.

Выбранное значение скорости печати позволяет обеспечить непрерывность потока экструзии материала, а также хорошую межслоевую адгезию. Незначительная корректировка подачи материала осуществляется введением коэффициента подачи. Это позволяет достичь более однородного заполнения, что важно при 100% заполнении и будет влиять на прочностные и эксплуатационные характеристики изделия.

На втором этапе осуществлялось 3D-сканирование напечатанной детали. В результате этого процесса было сформировано облако точек, затем объединенное в единую полигональную модель. Следует обратить внимание, что сканирование полностью всех поверхностей на детали невозможно в силу технологических особенностей процесса. Таким образом, скрытые поверхности не отображаются на скане. К таким поверхностям относятся частичные зоны направляющих лопаток.

На следующем этапе анализа отклонений пространственной геометрии изделия выполнялась обработка данных в программном обеспечении (ПО) 3D Systems Control X. Для начала в ПО загружается файл твердотельной модели направляющей части турбинного насоса, который служит эталонными данными при выполнении дальнейших расчетов. После этого в программу загружаются измеренные данные в виде полигональной модели, полученной в ходе 3D-сканирования напечатанной детали.

Для корректного анализа необходимо совместить измеренные данные с эталонными, так как глобальная система координат твердотельной модели не совпадает с локальной системой координат полигональной модели скана (рис. 3).

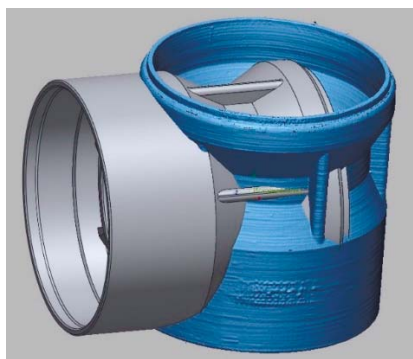


Рис. 3. Твердотельная и полигональная модели до совмещения геометрии

При наличии уникальной геометрии совмещение можно выполнить в автоматическом режиме. В этом режиме программное обеспечение анализирует конструктивные элементы на моделях и совмещает их по принципу наилучшего совпадения. По результатам совмещения выдается статистический отчет в табличной форме (табл. 2) и в виде гистограммы (рис. 4).

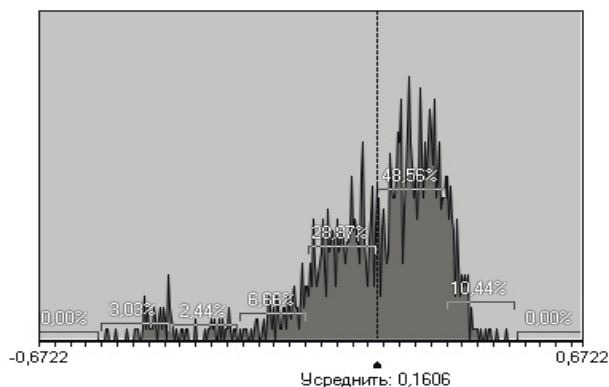


Рис. 4. Гистограмма отклонений совмещения эталонных и измеренных данных: $-6\sigma - 0\%$; $-5\sigma - 0\%$; $-4\sigma - 3,03\%$; $-3\sigma - 2,44\%$; $-2\sigma - 6,66\%$; $-1\sigma - 28,87\%$; $1\sigma - 48,56\%$; $2\sigma - 10,44\%$; $3\sigma - 0\%$; $4\sigma - 0\%$; $5\sigma - 0\%$; $6\sigma - 0\%$

Таблица 2

Результаты совмещения моделей

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-0,5058
Максимальное отклонение, мм	0,4815
Среднее отклонение, мм	0,1606
Среднеквадратичное отклонение	0,2342
Стандартное отклонение	0,1705
Вариация	0,0291
Среднее положительное отклонение, мм	0,2109
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1751

Анализируя результаты совмещения моделей, можно сделать первичные заключения о достаточно высокой точности совмещения напечатанной детали с исходной 3D-моделью, о чем свидетельствуют значения СКО и СО. По этим данным невозможно сделать точное заключение о пригодности напечатанной детали к дальнейшей эксплуатации и конкретным значениям отклонений от пространственной геометрии на наиболее важных поверхностях (например, посадочных и рабочих), которые будут определять работоспособность и собираемость изделия. Поэтому для уточнения необходимо провести трехмерный анализ отклонений.

Для проведения трехмерного анализа необходимо задать значения предельных отклонений. Были заданы значения $\pm 0,1$ мм. С учетом этих допусков была построена трехмерная модель отклонений (рис. 5).

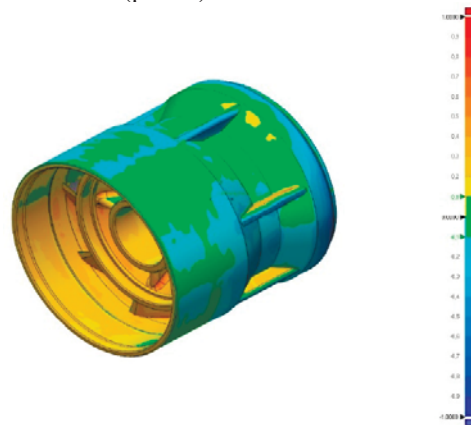


Рис. 5. Объемная модель результатов 3D анализа отклонений геометрических размеров

Гистограмма распределения отклонений представлена на рисунке 6.

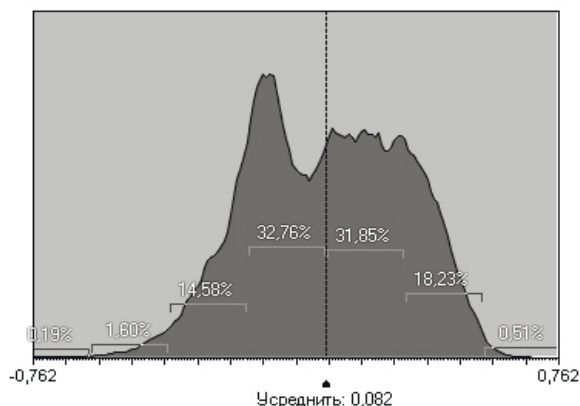


Рис. 6. Гистограмма 3D сравнения отклонений геометрии:
 $-6\sigma - 0,0098\%$; $-5\sigma - 0,0184\%$; $-4\sigma - 0,1894\%$; $-3\sigma - 1,5963\%$;
 $-2\sigma - 14,5788\%$; $-1\sigma - 32,7578\%$; $1\sigma - 31,851\%$; $2\sigma - 18,2285\%$;
 $3\sigma - 0,5081\%$; $4\sigma - 0,0224\%$; $5\sigma - 0,0116\%$; $6\sigma - 0,0059\%$

В таблице 3 приведены результаты статистического анализа данных 3D сравнения моделей.

Таблица 3

Результаты 3D сравнения геометрии моделей

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-1,2111
Максимальное отклонение, мм	1,2108
Среднее отклонение, мм	0,082
Среднеквадратичное отклонение	0,241
Стандартное отклонение	0,2267
Вариация	0,0514
Среднее положительное отклонение, мм	0,2324
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1497
В поле допуска, %	27,98
Вне поля допуска, %	72,02

В целом, поскольку среднее отклонение положительное, можно сделать вывод о том, что в основном при печати происходит увеличение размеров относительно номинальных, то есть имеется припуск на последующую механическую обработку. Однако, большие значения минимальных и максимальных отклонений, а также высокая доля поверхностей, находящихся вне поля допуска, свидетельствуют о наличии нарушений при 3D-печати. Было проведено детальное изучение месторасположений максимальных и минимальных отклонений геометрии, в ходе которого установлено, что зона максимального отклонения находится в месте примыкания направляющих лопаток к ступичной части, что является недопустимым. При этом данный дефект печати носит единичный характер так как не повторяется на других лопатках. Зона минимальных отклонений располагается на боковой поверхности ребер жесткости, при этом на противоположной стороне каждого из ребер находится зона положительных отклонений. Это свидетельствует об угловом отклонении при печати.

Немаловажным фактором является точность геометрических размеров в направлении координатных осей XY. Для их определения был произведен анализ в одном поперечном (рис. 7) сечении. Результаты статистической обработки приведены в таблице 4.

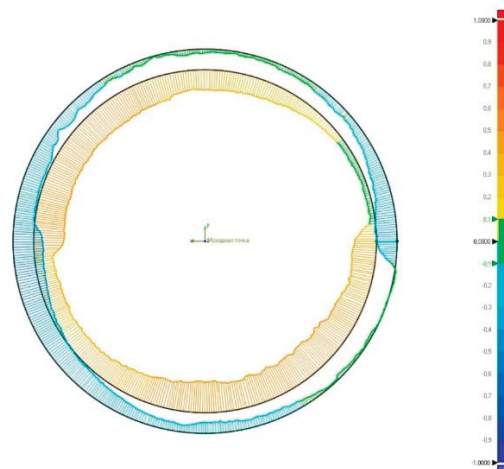


Рис. 7. Отклонения поперечного сечения от круглости

Таблица 4

Результаты анализа отклонения поперечного сечения от круглости

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-0,4705
Максимальное отклонение, мм	0,4958
Среднее отклонение, мм	0,0736
Среднеквадратичное отклонение	0,2942
Стандартное отклонение	0,2848
Вариация	0,0811
Среднее положительное отклонение, мм	0,3342
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1767
В поле допуска, %	21,9814
Вне поля допуска, %	78,0186

По результатам анализа данных об отклонении от круглости в поперечном сечении, можно сделать вывод о незначительных проблемах с механической частью 3D-принтера, так как на карте отклонений видно, что в одной зоне происходит уменьшение размеров по сравнению с номинальным. В некоторых случаях это может зависеть от технического состояния приводных ремней и направляющих валов. Если наблюдается более выраженное различие размеров по двум взаимно перпендикулярным осям, это может свидетельствовать о неверной калибровке шаговых двигателей в прошивке 3D-принтера.

Также был проведен анализ отклонений в пространственной геометрии в направлении оси Z (рис. 8). Результаты анализа представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты анализа отклонения пространственной геометрии продольного сечения

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-0,9445
Максимальное отклонение, мм	1,2435
Среднее отклонение, мм	0,1635
Среднеквадратичное отклонение	0,2684
Стандартное отклонение	0,2129
Вариация	0,0453
Среднее положительное отклонение, мм	0,2649
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1076
В поле допуска, %	25,0521
Вне поля допуска, %	74,9479

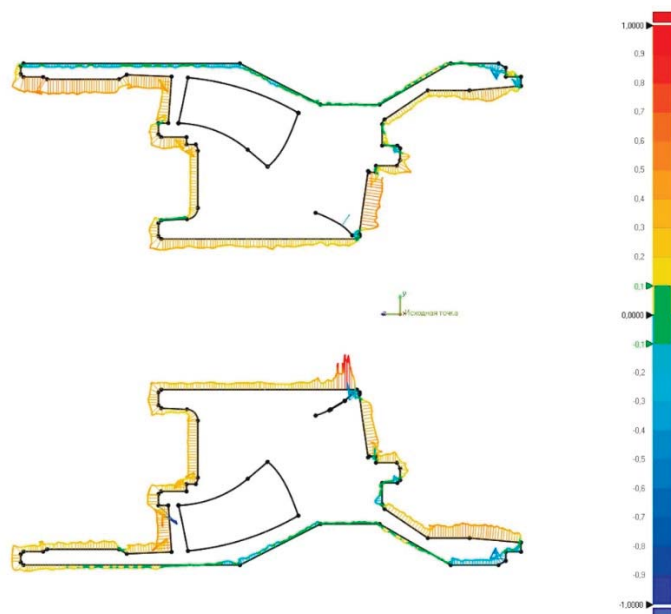


Рис. 8. Отклонения пространственной геометрии продольного сечения

Анализ результатов статистического расчета и визуального отображения векторов отклонений подтверждает предположение о нарушении механической калибровки осей 3D-принтера. Из-за этого происходит деформация детали с нарушением ее концентричности. Положительный максимум свидетельствует о местной переэкструзии материала, которая могла быть вызвана нарушением в подаче материала, скапливанием на кончике сопла 3D-принтера и последующим отрывом в указанной зоне излишков материала.

При проведении анализа пространственной геометрии необходимо четко понимать назначение детали, проводить тщательное изучение отдельных поверхностей с категоризацией на рабочие, сопрягаемые и необрабатываемые поверхности. Также необходимо верно назначать допуски на размеры и взаимное расположение поверхностей с учетом технических требований на изделие.

Значительное внимание в настоящее время в сфере аддитивного производства уделяется вопросам оптимизации временных затрат на изготовление деталей. Однако, при этом мало кто учитывает, что зачастую печатаются изделия, которые по своим геометрическим параметрам не соответствуют изначальной модели. Полученные результаты исследования позволяют обратить внимание на проблематику 3D-печати, связанную с технологическими особенностями. Следует значительное внимание уделять не только повышению производительности 3D-печати, но и техническому состоянию и настройке 3D-принтера перед печатью.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить преобладающие факторы, способствующие отклонениям в пространственной геометрии деталей, изготовленных методом аддитивного производства Fused Deposition Modeling (FDM). Главный вывод заключается в том, что основным фактором, влияющим на отклонения геометрии, является приоритет скорости печати над точностью размеров изделия и целостностью

поверхности. Это подчеркивает важность сбалансированного подхода к оптимизации параметров, учитывающего как эффективность производства, так и геометрическую точность.

Установлено, что постоянный мониторинг технического состояния оборудования для аддитивного производства необходим для минимизации отклонений, связанных с геометрией. Изменения в износе сопла, консистенции экструзии и термической стабильности оборудования были определены как значительные факторы, способствующие неточностям в размерах.

Полученные результаты подчеркивают необходимость комплексного исследования дополнительных критических элементов, влияющих на точность печати, включая качество и состав материала, точный выбор параметров печати (например, высота слоя, плотность заполнения, скорость печати) и точность настроек принтера.

В данном исследовании использовалось программное обеспечение 3D Systems Control X, предоставляя точные инструменты геометрической оценки и позволяя проводить детальный анализ размеров. Широкие возможности контроля Control X, в частности, в области юстировки, оценки допусков и визуализации отклонений, позволили точно выявлять и количественно оценивать отклонения. Это стало важным шагом в оценке ограничений процесса FDM и его оптимизации.

В заключение следует отметить, что необходимы дальнейшие исследования для уточнения параметров, используемых при FDM-печати, и разработки улучшенных правил эксплуатации. Это позволит повысить точность и качество продукции при использовании FDM-печати, тем самым приведя ее в соответствие со строгими промышленными и техническими требованиями к прецизионному производству.

Благодарности

Данная статья подготовлена в рамках выполнения 1-го этапа научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка научных, методологических и практических основ реверсивного инжиниринга для решения комплексных задач импортозамещения в агропромышленном комплексе Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2024-0026).

Литература

1. Абрамова Т.С. Аддитивные технологии в современном мире // Молодая наука : Сборник статей по итогам II Научных чтений молодых исследователей, Новосибирск, 18 апреля 2023 года. Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 10-16.
2. Абросимов С.Н., Буткарев А.Г., Тихонов-Бугров Д.Е. О внутренней топологии изделий, напечатанных на 3D принтере // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2022. Т. 1. С. 121-122.
3. Афошин А.А. Влияние скорости на геометрические размеры изделий при 3D-печати по FDM-технологии // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2019. № 15(58). С. 113-118.
4. Бирюков Ю.А., Кардаш Д.Е. Барьеры, препятствующие развитию аддитивных технологий // Строительные и дорожные машины. 2023. № 5. С. 48-52.
5. Гуцин И.А. Аддитивное производство изделий повышенной прочности на пятиосевых FDM 3D-принтерах : диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Гущин Илья Александрович, 2023. 139 с.

6. *Дворянкин О.А., Дворянкин А.О.* Влияние режимов 3D-печати на усадку моделей изготавливаемых методами FDM печати // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 101-4. С. 136-142. DOI 10.18411/tmio-09-2023-193.

7. *Елисейкин Е.И., Калачев О.Н.* Влияние особенностей подготовки цифровой модели на качество поверхностей изделия в FDM 3D-печати // Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России : Материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара, Нижневартовск, 06 апреля 2018 года. Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2018. С. 120-123.

8. *Зверовицков А.Е., Шелахаев Д.А., Нестеров С.А.* Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 1(49). С. 66-78. DOI 10.21685/2072-3059-2019-1-6.

9. *Кочетова А.А.* Особенности применения и развития аддитивных технологий // Инновации и инвестиции. 2023. № 10. С. 224-225.

10. *Михальченко А.А., Невзорова А.Б.* Анализ факторов, влияющих на размерную точность углов изделий при обработке технологии 3D-печати // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2024. № 1(277). С. 82-86. DOI 10.52065/2520-2669-2024-277-11.

11. *Михальченко А.А., Невзорова А.Б.* Повышение точности 3d-печати методом FDM путем изменения параметров 3D-принтера // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сборник научных трудов. Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2023. С. 140-143.

12. *Можегова Ю.Н., Климова И.В.* Анализ возможностей аддитивных технологий, применяемых в машиностроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 12. С. 531-536. DOI 10.36652/0202-3350-2022-23-12-531-536.

13. *Нестеров В.Е.* Повышение точности изделий из пластика, изготовленного по технологии FDM, в аддитивном производстве // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, Тюмень, 20-22 декабря 2023 г. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. С. 68-70.

14. *Поротикова И.В., Кириллова М.Б., Сербул Д.В.* Повышение точности изделий, изготавливаемых с помощью 3D-принтеров // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 99-102. DOI 10.46418/2619-0729_2022_1_15.

15. *Поротикова И.В., Сербул Д.В., Кириллова М.Б.* Технология моделирования и изготовления детали сложной формы с применением 3D-печати // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2021. № 4. С. 66-74. DOI 10.46418/2619-0729_2021_4_8.

16. *Потанов А.А.* Конструкторско-технологическое обеспечение FDM-печати // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 388-396. DOI 10.24412/2071-6168-2024-5-388-389.

17. *Родичев А.Ю., Горин А.В.* Совершенствование процесса применения аддитивной технологии при техническом обслуживании и ремонте машин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 3(359). С. 58-67. DOI 10.33979/2073-7408-2023-359-3-58-67.

18. *Савицкий В.В., Голубев А.Н., Быковский Д.И.* Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2018. № 2(35). С. 52-61. DOI 10.24411/2079-7958-2018-13506.

19. *Симачук А.С.* Перспективы использования аддитивных технологий // Коррекционно-педагогическое образование: электронный журнал. 2022. № 4(34). С. 76-79.

STUDY OF DEVIATIONS OF THE ACTUAL GEOMETRY OF PARTS MANUFACTURED BY 3D-PRINTING TECHNOLOGY FROM THE NOMINAL GEOMETRY OF THEIR DIGITAL COUNTERPARTS

Maria Yu. Karelina, Moscow Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia;
State University of Management, Moscow, Russia, karelinamu@mail.ru

Vladimir V. Filatov, State University of Management, Moscow, Russia, 2vfilatov@gmail.com

Ilya S. Nefyolov, State University of Management, Russia, Moscow, iljanefelov@yandex.ru

Dmitry S. Taldykin, State University of Management, Moscow, Russia
Moscow Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia, dima.dima.taldykin@mail.ru

Abstract

Recently, additive technologies have been actively introduced into various manufacturing processes, including agriculture and the production of machinery and equipment. Despite the continuous improvement of 3D printing equipment, the problem of accuracy of printed products remains relevant. With the increased reliability requirements of additive products, spatial deviations occurring in the 3D printing process have a significant impact on the quality of the final product. The main objective of this study was to identify and analyze the spatial geometry deviations between printed products and their electronic 3D model. The study utilized geometric dimensioning techniques, including the use of 3D scans of printed parts and their remanufacturing using FDM (Fused Deposition Modeling) technology. A turbine pump guide part was selected as the object of study. Typical deviations in the spatial geometry of products printed using this technology were identified, the main causes of which are mechanical malfunctions of equipment and violations in the settings of 3D printers. Based on the data obtained, recommendations for optimizing 3D printing processes aimed at improving the quality of manufactured parts were developed. The application of these recommendations, including the use of software for control and adjustment of printing, will not only improve the quality of printed products, but also reduce material intensity in the production of complex parts, which will contribute to the further development of additive technologies.

Keywords: 3D printing, quality control, spatial geometry, deviations, software.

References

- [1] T. S. Abramova, "Additive technologies in the modern world," *Young Science: Collection of articles based on the results of the II Scientific readings of young researchers*. Novosibirsk, April 18, 2023. Novosibirsk: Sibiryakov State University of Transport; 2023, pp. 10-16.
- [2] S. N. Abrosimov, A. G. Butkarev, D. E. Tikhonov-Bugrov, "On the internal topology of products printed on a 3D printer," *Modern Education: Content, Technologies, Quality*. 2022, no. 1, pp. 121-122.
- [3] A. A. Afoshin, "The influence of speed on the geometric dimensions of products during FDM technology 3D printing," *Collection of scientific works of the Donbas State Technical University*. 2019, no. 15(58), pp. 113-118.
- [4] Y. A. Biryukov, D. E. Kardash, "Barriers hindering the development of additive technologies," *Construction and Road Machinery*. 2023, no. 5, pp. 48-52.
- [5] I. A. Gushchin, "Additive production of high-strength products on five-axis FDM 3D printers," Dissertation for the degree of candidate of technical sciences; 2023, 139 p.
- [6] O. A. Dvoryankin, A. O. Dvoryankin, "The influence of 3D printing modes on the shrinkage of models produced by FDM printing methods," *Trends in the Development of Science and Education*. 2023, no. 101(4), pp. 136-142. doi:10.18411/trnio-09-2023-193
- [7] E. I. Eliseikin, O. N. Kalachev, "The impact of the features of digital model preparation on the quality of product surfaces in FDM 3D printing. Actual Problems of Automation and Energy Saving in the Fuel and Energy Complex of Russia," *Materials of the All-Russian scientific and practical seminar with international participation*, Nizhnevartovsk, April 6, 2018. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University, 2018, pp. 120-123.
- [8] A. E. Zverovshchikov, D. A. Shelakhayev, S. A. Nesterov, "Investigation of dimensional accuracy provided by 3D printing technology," *Proceedings of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences*. 2019, no. 1(49), pp. 66-78. doi:10.21685/2072-3059-2019-1-6
- [9] A. A. Kochetova, "Features of the application and development of additive technologies," *Innovations and Investments*. 2023, no. 10, pp. 224-225.
- [10] A. A. Mikhalechenko, A. B. Nevorova, "An analysis of the factors influencing the dimensional accuracy of the angles of products during the technology of 3D printing," *Proceedings of BSTU*. 2024, no. 1(277), pp. 82-86. doi:10.52065/2520-2669-2024-277-11
- [11] A. A. Mikhalechenko, A. B. Nevorova, "Increasing the accuracy of 3D printing by FDM by changing the parameters of the 3D printer," *Strategy and Tactics for the Development of Production and Economic Systems: Collection of Scientific Papers*. Gomel: Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 2023, pp. 140-143.
- [12] Yu. N. Mozhegova, I. V. Klimova, "Analysis of the capabilities of additive technologies used in mechanical engineering," *Assembly in mechanical engineering, instrument making*. 2022. No. 12., pp. 531-536. DOI 10.36652/0202-3350-2022-23-12-531-536
- [13] V. E. Nesterov, "Increasing the accuracy of plastic products manufactured using FDM technology in additive production," *Energy Saving and Innovative Technologies in the Fuel and Energy Complex*. Materials of the National scientific and practical conference with international participation of students, graduate students, scientists, and specialists, Tyumen, December 20-22, 2023. Tyumen: Tyumen Industrial University. 2023, pp. 68-70.
- [14] I. V. Porotikova, M. B. Kirillova, D. V. Serbul, "Improving the accuracy of products manufactured using 3D printers," *Bulletin of Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies*. 2022, no. 1, pp. 99-102. doi:10.46418/2619-0729_2022_1_15
- [15] I. V. Porotikova, D. V. Serbul, M. B. Kirillova, "Technology of modeling and manufacturing a complex-shaped part using 3D printing," *Bulletin of Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies*. 2021, no. 4, pp. 66-74. doi:10.46418/2619-0729_2021_4_8
- [16] A. A. Potapov, "Design and technological support for FDM printing," *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2024, no. 5, pp. 388-396. doi:10.24412/2071-6168-2024-5-388-389
- [17] A. Y. Rodichev, A. V. Gorin, "Improving the process of applying additive technology in the maintenance and repair of machines," *Fundamental and Applied Problems of Technology and Engineering*. 2023, no. 3(359), pp. 58-67. doi:10.33979/2073-7408-2023-359-3-58-67
- [18] V. V. Savitsky, A. N. Golubev, D. I. Bykovsky, "Investigating the influence of 3D printing parameters on the dimensional accuracy of products," *Bulletin of Vitebsk State Technological University*. 2018, no. 2(35), pp. 52-61. doi:10.24411/2079-7958-2018-13506
- [19] A. S. Simachuk, "Prospects for the use of additive technologies," *Correctional and Pedagogical Education: Electronic Journal*. 2022, no. 4(34), pp. 76-79.

Information about authors:

Maria Yu. Karelina, Ph.D., Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia; Vice-Rector, State University of Management, Moscow, Russia

Vladimir V. Filatov, Ph.D., Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Reverse Engineering, State University of Management, Moscow, Russia

Ilya S. Nefyolov, Ph.D., Associate Professor, Research Associate, Reverse Engineering Laboratory, State University of Management, Moscow, Russia

Dmitry S. Taldykin, Technician, Reverse Engineering Laboratory, State University of Management, Moscow, Russia;

Moscow Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Казанцев Сергей Юрьевич,
Московский Технический Университет Связи и Информатики,
Москва, Россия, s.i.kazantsev@mtuci.ru

Сапожников Максим Вячеславович,
Московский Технический Университет Связи и Информатики,
Москва, Россия, m.v.sapozhnikov@mtuci.ru

Миронов Юрий Борисович,
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт",
Москва, Россия, [ymironov@jssc.ru](mailto:yurov@jssc.ru)

Терехин Дмитрий Николаевич,
Московский Технический Университет Связи и Информатики,
Москва, Россия, d.n.terehin@mtuci.ru

Бурдин Антон Владимирович,
АО "Научно-производственное объединение государственный
оптический институт им. С.И. Вавилова", г. Санкт-Петербург, Россия;
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича",
г. Санкт-Петербург, Россия;
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и
информатики Самара, Россия, bourdine@yandex.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-21-30

Manuscript received 27 November 2024;
Accepted 15 December 2024

*Мироновым Ю.Б. работа выполнялась
в НИЦ "Курчатовский институт" в рамках
государственного задания по теме FNEF-2024-0014.*

Ключевые слова: оптическая связь в свободном пространстве, атмосферные оптические линии связи, квантовое распределение ключей, безопасность промышленных комплексов, гибридные линии связи, доступность канала связи

Предложена концепция реализации гибридных линий связи на промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации, базирующихся на применении атмосферной оптической связи. Рассмотрены сценарии развертывания коммуникационной сети связи на основе использования терминалов атмосферных оптических линий связи, работающих в спектральной полосе 1550 нм. Показано, что наличие значительных успехов в развитии квантовых технологий стимулирует исследования в области реализации квантовых сетей для защиты систем управления энергетическими сетями, для которых целесообразно использовать гибридные линии связи с передачей данных по оптическому каналу связи, которые могут быть реализованы через коммерческие оптические терминалы. Проанализирована возможность применения атмосферной оптической связи в качестве основного и резервного канала для передачи данных в регионах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации, последовательно рассмотрены тепловые электростанции (ТЭС), нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ), гидроэлектростанции (ГЭС). Основываясь на статистике климатических условий в регионах расположения таких объектов за 12 лет и технических параметрах современных российских терминалов показана эффективность применения оптических терминалов на крупных промышленных и энергетических объектах Российской Федерации.

Информация об авторах:

Казанцев Сергей Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры "Направляющие телекоммуникационные среды", Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

Сапожников Максим Вячеславович, инженер, Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

Миронов Юрий Борисович, к.т.н., ведущий инженер, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

Терехин Дмитрий Николаевич, аспирант, Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., доцент, советник генерального директора по инновациям, АО "Научно-производственное объединение государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", г. Санкт-Петербург, Россия;

профессор кафедры оптических и квантовых систем связи, ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича", г. Санкт-Петербург, Россия;

профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи, ФГБОУ ВО "Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики Самара, Россия

Для цитирования:

Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Терехин Д.Н., Бурдин А.В. Перспективы применения атмосферной оптической связи на крупных промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 21-30.

For citation:

S. Yu. Kazantsev, M. V. Sapozhnikov, Yu. B. Mironov, D. N. Terekhin, A. V. Burdin, "Prospects for the application of atmospheric optical communications in large industrial and energy complexes of the Russian Federation," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.1, pp. 21-30. (in Russian)

Введение

Высокие темпы цифровизации производств, создание полностью роботизированных систем с удалённым мониторингом и управлением [1, 2], требуют передачи все более значительных объемов данных по защищённым каналам связи [1]. Эта тенденция в полной мере относится и к крупному энергогенерирующему производству. Современные промышленные и энергетические комплексы, такие как: тепловые электростанции (ТЭС), нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ), атомные электростанции (АЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС) являются ключевыми элементами, определяющими уровень развития экономики государства. Такие объекты располагаются на достаточно большой территории и содержат в своем составе много зданий и помещений (технические, административные, инженерные и т.п.), как правило, удаленных друг от друга на значительные расстояния [3, 4].

В то же время, постоянно растет объём передаваемой информации: высокоскоростной интернет, видеоконференция, передача видеонаблюдения, IP-телефония, потоковое вещание и т.д. На таких объектах необходимо всегда иметь резервные беспроводные каналы передачи информации, которые, в том числе, как и основной канал связи, должны соответствовать высоким требованиям безопасности, поскольку обеспечивают связь на объектах повышенного риска [4, 5]. Поэтому для увеличения качества связи и повышения пропускной способности в промышленных сетях крупных предприятий целесообразно объединять нескольких каналов передачи данных в один виртуальный канал [6-8], тем самым реализуются гибридные линии связи. В гибридной линии связи могут использоваться разные технологии, такие как оптические волокна, медные кабели и беспроводные каналы передачи информации, что позволяет более эффективно использовать ресурсы коммуникационной сети.

Значительное внимание к совершенствованию систем и технологий гибридных сетей связи является общей тенденцией, которая прослеживается, как при анализе пленарных докладов, представляемых на профильных научно-технических конференциях, так и проведении наукометрического анализа публикационной активности [9, 10]. В частности, кроме традиционных волоконно-оптических линий связи для подключения к высокоскоростному интернету параллельно используется беспроводные системы, использующие радиочастотный диапазон спектра [11].

Последнее время в области инфокоммуникаций большое внимание уделяется также развитию квантовых технологий [12, 13]. Угрозы появления у злоумышленников доступа к мощным квантовым компьютерам и их применения для взлома традиционных систем асимметричного шифрования привели к необходимости принятия дополнительных мер к защите информации, передаваемой по общедоступным сетям связи, в результате сегодня в системах управления промышленными комплексами и энергетическими сетями активно прорабатываются возможности использования технологии квантового распределения ключей (КРК) [12, 14]. Технология КРК использует квантовые протоколы, предоставляющие надежный метод обмена криптографическими ключами шифрования, устойчивыми к атакам со стороны злоумышленников, обладающих неограниченной вычислительной мощностью [15, 16].

В связи с этим, одной из наиболее актуальных проблем передачи данных с удаленных объектов промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации является выбор оптимальной технологии связи при обеспечении безопасности информации, передаваемой на такие объекты (а именно, объекты повышенного риска) в условиях возможностей перехвата сетевого трафика и применения квантового компьютера для взлома системы шифрования. В работах [4, 17], где анализировались критерии выбора технологии для резервного канала связи применительно к АЭС и объектам использования термоядерной энергии [5], в качестве перспективной технологии связи, позволяющей обеспечить высокую скорость передачи данных и защиту передаваемой информации, в том числе от квантовых угроз, рассматривается атмосферная оптическая связь.

Принцип работы такой связи основан на передаче данных модулированным излучением в ближней инфракрасной части спектра, что как показывают расчеты [17], позволяет обеспечить достаточно стабильную связь на территории АЭС, расположенных в Российской Федерации. Современные атмосферные оптические линии связи (АОЛС), по отношению к другим видам связи, имеют следующие ключевые преимущества: возможность обеспечения высокой скорости обмена информацией (10 Гбит/с и более), отсутствие необходимости получения лицензии и специальных разрешений на использование частот радиодиапазона, что гарантирует оперативное развертывание и настройку такой системы, возможность реализации технологии квантового распределения ключей на основе модульного подхода [18, 19] и невосприимчивость к электромагнитным помехам, порождаемых грозowymi явлениями [20]. Последнее обстоятельство стало особенно актуальным по мере того, как при передаче информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) стали применяться сложные системы мультиплексирования и увеличилась скорость передачи данных, что сразу обнаружило чувствительность к помехам от грозowych разрядов не только радиолоний, но и ВОЛС [21-23].

Для АОЛС помехи от электромагнитных полей, порождаемых грозowymi явлениями, не оказывают заметного влияния, а внешние электромагнитные поля, воздействующие на оптический кабель, увеличивают частоту квантовых битовых ошибок при реализации КРК по ВОЛС [22, 23], поэтому при реализации КРК в условиях импульсных электромагнитных помех, АОЛС имеют дополнительное преимущество перед ВОЛС.

Однако, при всех описанных достоинствах атмосферной оптической связи, необходимо отметить и ряд проблем, обусловленных изменчивостью среды передачи данных. Действительно, поскольку среда распространения сигнала является атмосфера, такая связь, в значительной степени зависит от возмущений оптической плотности на атмосферной трассе, а вследствие этого, зависит от различных внешних факторов, в частности: погоды (туман, дымка, снег, сильный дождь и т.п.), особенностей географического места расположения приемо-передающих терминалов атмосферной связи; протяженности трассы и явлений поглощения и рассеяния на примесях могущих присутствовать в атмосферном воздухе [4, 20]. Изменчивость оптических параметров передачи данных в атмосфере крайне негативно сказываются при реализации технологии КРК на ее эффективности и доступности [18].

Обычно, в первую очередь, выделяют следующие факторы атмосферы, изменчивость которых следует учитывать: атмосферное поглощение, рассеяние, происходящее при взаимодействии лазерного луча с молекулами газов и частицами аэрозолей в воздухе, а также наличие турбулентностей, способных вызвать отклонение лазерного пучка и изменить распределение мощности по апертуре пучка на стороне приемника [24].

В стандартной атмосфере Земли на видимых и ИК-длинах волн основными «поглотителями» являются молекулы воды, углекислого газа и озона [25]. В ослабление лазерного излучения при распространении в свободной атмосфере вносит вклад Рэлеевское рассеяние, что может быть критично для передачи информации на атмосферных трассах свыше 1 км для систем АОЛС, работающих на длинах волн менее 0.9 мкм. В случае, когда размеры аэрозольных частиц сопоставимы по размеру с длиной волны лазера, основной вклад в ослабление мощности лазерного излучения вносит рассеяние Ми [24], именно такое рассеяние является основной причиной затухания на используемых длинах волн лазера. Исходя из этого, при проектировании систем АОЛС, выбирается длина волны с наименьшими значениями поглощения и рассеяния. Такие диапазоны известны, как окна прозрачности [25]. Именно этот факт, в том числе, обуславливает выбор следующих рабочих длин волн для приемо-передающих терминалов АОЛС: 850 и 1550 нм.

На отечественном рынке терминалов атмосферной связи присутствуют компании: «Оптические ТелеСистемы», г. Санкт-Петербург (терминалы «ЛАНтастИКА»); «Мостком», г. Рязань (терминалы «Artolink»); «Лазерные Информационные Телекоммуникации», г. Екатеринбург, (терминалы «ОСС»). Системы от компании «Мостком» (<https://mostkom.ru/mobile-terminals>) уже сейчас могут работать с оборудованием КРК [5, 19], поэтому параметры серийных изделий (приемо-передающих терминалов атмосферной связи) именно этой фирмы использованы для выполнения расчетов доступности канала связи АОЛС для всех регионов расположения АЭС в работе [17].

Таблица 1

Промышленные и энергетические комплексы Российской Федерации

ТЭС	НПЗ	ГЭС
Сургутская ГРЭС-2	Омский НПЗ	Саяно-Шушенская ГЭС
Рефтинская ГРЭС	Киришинефтеоргсинтез	Красноярская ГЭС
Костромская ГРЭС	Рязанский НПЗ	Братская ГЭС
Пермская ГРЭС	Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез	Усть-Илимская ГЭС
Сургутская ГРЭС-1	Ярославнефтеоргсинтез	Богучанская ГЭС
Рязанская ГРЭС	Лукойл-Волгограднефтепереработка	Волжская ГЭС
	Лукойл-Пермнефтеоргсинтез	
	Московский НПЗ	
	Ангарская нефтехимическая компания	
	Газпром нефтехим Салават	
	Башнефть-Уфанефтехим	
	Туапсинский НПЗ	

Целью настоящей работы являлось дальнейшее развитие подхода заложенного в работах [5, 17] и проработка концепции использования АОЛС при реализации гибридных линий связи на промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации, а также расчета доступности АОЛС на основе данных многолетней статистики метеорологических данных по каждому конкретному региону, где расположены эти промышленные комплексы, приведенные в таблице 1.

2. Общая концепция применения АОЛС

На рисунках 1 и 2 представлен возможный вариант интеграции системы АОЛС, на примере нескольких разнесенных административных зданий, который предлагается реализовывать на крупных промышленных и энергетических комплексах. Атмосферная линия подключается к существующей структурированной кабельной системе (СКС) промышленного объекта, при этом следует отметить, что АОЛС позволяет, в том числе, решить проблемы «последней мили» [26].

В случае необходимости резервирования основного канала связи, при полном переходе на атмосферный оптический канал связи или при использовании «гибридной» связи, когда АОЛС встраивается лишь в часть участка сети связи. Системы АОЛС могут быть установлены на существующих объектах в гибридных конфигурациях, как показано на рисунке 2.

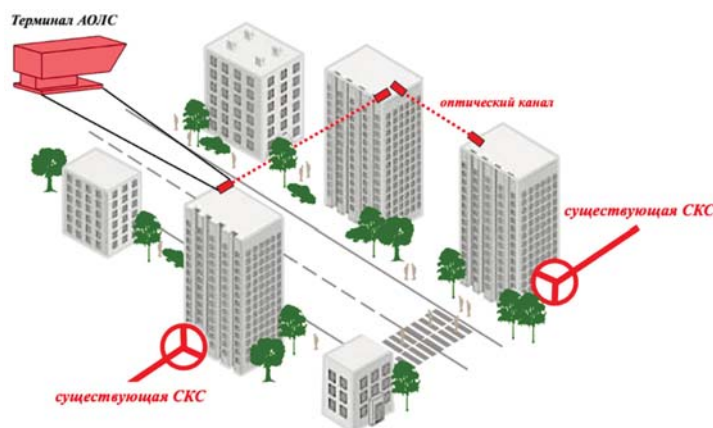


Рис. 1. Концепция применения АОЛС

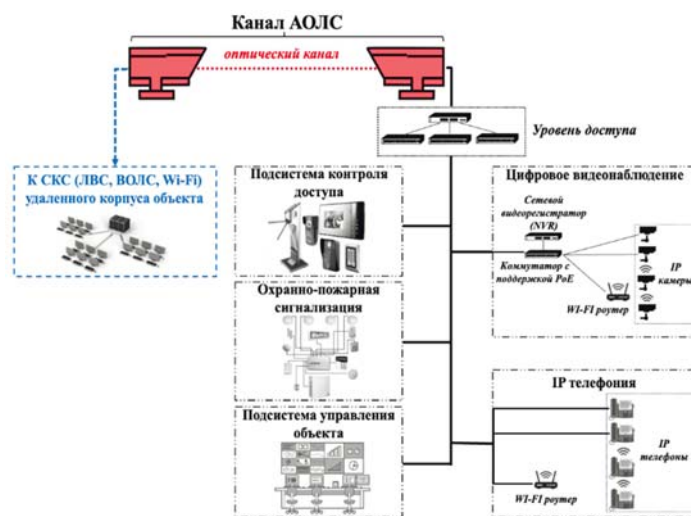


Рис. 2. Концепция применения АОЛС

Отметим возможные области применения АОЛС на промышленных комплексах:

1) мобильная и фиксированная связь в районе расположения объекта: соединение базовых станций в условиях сложной электромагнитной обстановки). Данная область становится все более актуальной, с появлением сетей 5G, так как возникает потребность в высокопроизводительных линиях связи на коротких расстояниях между базовыми станциями;

2) оперативное развертывание резервного канала в случае недоступности основного или во время ремонта основного поврежденного контура инфраструктуры коммуникационной сети предприятия;

3) построение быстродействующей локальной сети по топологии «звезда», «кольцо», «mesh» и подключение ее при необходимости, к Интернету в случае территориально удаленных сегментов сети, в том числе, проходящих через автомобильные и железнодорожные путепроводы, энергетические объекты, создающие сильные электромагнитные помехи, плотную городскую застройку, промышленные зоны, водные преграды, горы и другие участки местности, где прокладка кабельных соединений затруднена, невозможна (к примеру, в силу политики безопасности документированных руководящих принципов организации, регламентирующих, в том числе, управление и защиту информации, а также технические способы ее доведения), либо нерентабельности прокладки оптического кабеля;

4) увеличение пропускной способности существующей инфраструктуры.

Существует несколько подходов для оценки возможности и целесообразности реализации данной концепции применения АОЛС: качественный анализ возможности на основе составления матрицы применимости АОЛС рассматривался в работах [27, 28], где в качестве основы был использован подход работы [29], разработанный для оценки применимости АОЛС на предприятиях нефтегазового комплекса, а в работах [4, 5] была предложена количественная оценка целесообразности использования АОЛС на произвольном промышленном объекте.

Именно этот подход, впервые введенный в работе [4] для анализа перспективности АОЛС на объектах использования атомной энергии представляется нам наиболее правильным способом для определения целесообразности реализации линий связи на основе АОЛС для любых промышленных и энергетических комплексах, рассмотренных в настоящем исследовании. Одним из важнейших параметров, который согласно [4, 5], используется при вычислении критерия целесообразности применения АОЛС на промышленном объекте, является доступность канала атмосферной оптической связи, зависящая от местных климатических условий [17].

3. Анализ метеорологической дальности видимости в районах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации

Доступность канала АОЛС, вследствие ухудшения видимости (туманы, метели, снегопады, дожди), зависит от изменения параметра «видимости» [29-31]. Соответствие диапазонов «видимости» и погодных условий представлены в таблице 2.

Соответствие диапазонов «видимости» и погодных условий

Погодные условия	«Видимость», км
Густой туман	0.05-0.2
Умеренный туман	0.2-0.5
Легкий туман	0.5-2
Дымка	2-4
Легкая дымка	4-10
Ясно	10-50

Понятие «видимости» на практике связывают с понятием метеорологической дальности видимости (МДВ) [17, 29]. Очевидно, что, чем больше запас усиления терминала атмосферной линии, тем меньше влияние таких погодных явлений на работоспособность атмосферной линии связи и тем больше может быть протяжённость трассы. Методика измерения МДВ чаще всего основывается на ее определении визуально, по определённым, заранее выбранным объектам (тёмным на фоне неба), расстояние до которых известно [30]. Но имеется и ряд фотометрических приборов для инструментального измерения видимости, описанных, к примеру, в работе [31, 32]. Такие приборы используются для измерения видимости на аэродромах, где, определение метеорологической дальности видимости является одной из критически важных величин, от которой зависит безопасность посадки воздушного судна [33]. В условиях хорошей погоды, значение видимости условно считается 10 км, однако, реально, видимость, колеблется, в зависимости от влажности и запылённости воздушной трассы, в диапазоне от 10 до 100 км [31]. При слабом тумане дальность видимости составляет 500-1000 м, а при сильном тумане или сильной песчаной буре может снижаться до 100 метров и даже менее.

Изменение параметра МДВ носит случайный характер, зависящий от времени, конкретного географического места и различных погодных условий, таких как: туман, дымка, снег, дождь и т.п. Однако, в зависимости от конкретных географических условий расположения системы АОЛС, проанализировав статистику МДВ за определенный период, с ближайшей метеорологической станции, когда более надежные, полученные на месте данные отсутствуют, можно выявить систематический характер изменения данного параметра.

Обработанная, с помощью программного комплекса [34], статистика метеорологической дальности видимости (Архив погоды, METAR (gp5.ru)) в период с 2013 по 2024 год, с ближайших аэропортов для исследуемых регионов расположения всех крупных промышленных и энергетических комплексов России представлена на рис. 3-5. На рисунках приведены зависимости параметра МДВ от времени в сутках, полученные для разных месяцев в году, при этом параметр МДВ в конкретный час усреднялся с 2013 по 2024 год. Исходя из графиков, показанных на рисунках 3-5, видно, что для всех регионов расположения крупных промышленных и энергетических комплексов параметр МДВ:

- повышается в зимний период (ноябрь, декабрь, январь, февраль) в районе 13-18 часов дня, в остальные периоды времени стабильно имеет наименьшие значения;

- снижается в летний период (май, июнь, июль, август) в районе 4-6 часов ночи, а с 10 до 20 часов принимает максимальные значения;
- в зависимости от сезона, принимает минимальные значения в зимний период, а максимальные, в летний.

Такие выводы, а именно, по конкретному потенциальному району расположения приемо-передающих терминалов атмосферной связи, должны, однозначно, учитываться на этапе проектирования такой системы.

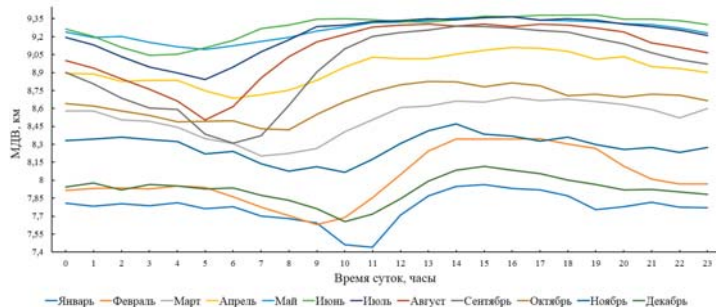


Рис. 3. МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток во всех регионах расположения исследуемых ТЭС на территории Российской Федерации

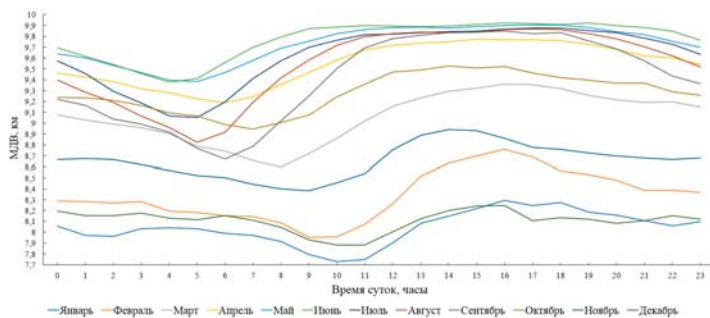


Рис. 4. МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток во всех регионах расположения исследуемых НПЗ на территории Российской Федерации

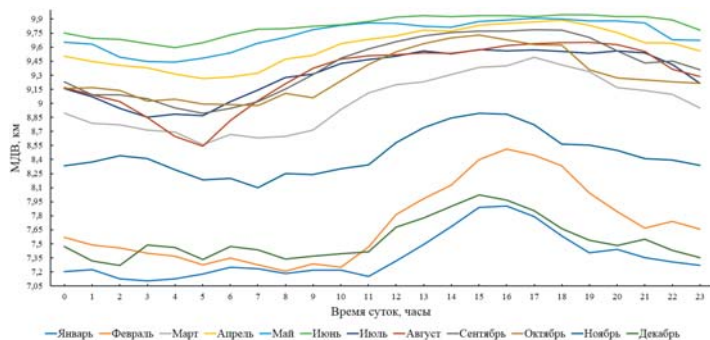


Рис. 5. МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток во всех регионах расположения исследуемых ГЭС на территории Российской Федерации

Однако, в указанные периоды, усредненный параметр МДВ все равно принимает приемлемые значения (в районе 7 км), что существенно не должно сказаться на общем параметре доступности системы АОЛС в исследуемых районах, однако, графики, представленные на рисунках 3-5, носят оценочный характер, так как усреднялись по объектам в разных географических регионах.

Очевидно, что для конкретного промышленного объекта необходимо учитывать характерное для данной местности распределение МДВ по времени. Соответствующие особенности распределения параметра дальности видимости с учетом полученных диаграмм зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых крупных промышленных и энергетических комплексов, представлены на рисунках 6-8.

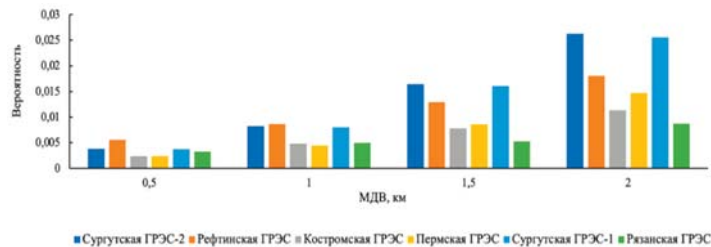


Рис. 6. Диаграмма зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых ТЭС на территории Российской Федерации

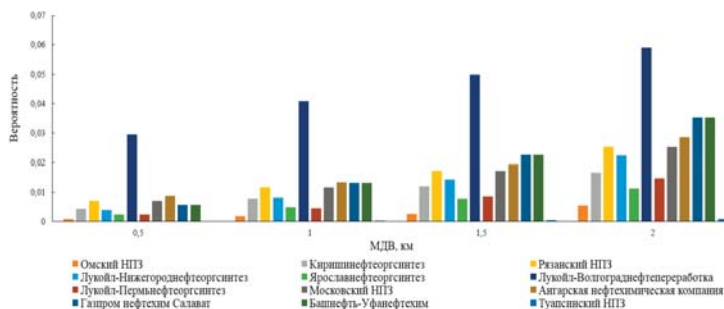


Рис. 7. Диаграмма зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых НПЗ на территории Российской Федерации

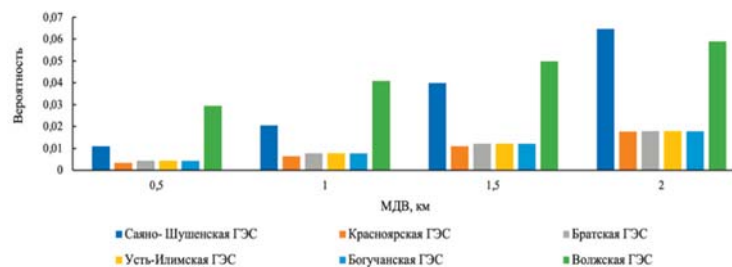


Рис. 8. Диаграмма зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых ГЭС на территории Российской Федерации

Основываясь на полученных диаграммах (рис. 6-8), можно сделать вывод, что параметр МДВ, в исследуемых регионах, исходя из статистики за 12 лет опускался ниже значения 1 км с максимальной вероятностью 4% с учетом регионов расположения НПЗ Лукойл-Волгограднефтепереработка и Волжской ГЭС, в остальных случаях вероятность не превышала 2%, что говорит о высоких перспективах использования систем связи на основе АОЛС в рассматриваемых регионах. Таким образом, районы расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации достаточно благоприятны для реализации атмосферной оптической связи.

4. Оценка целесообразности использования АОЛС в районах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации

Доступность канала АОЛС зависит от допустимого ослабления мощности сигнала между передатчиком и приемником на заданном расстоянии между терминалами, климатических особенностей местности и суммарных потерь. Таким образом, доступность канала АОЛС (А_д) можно оценивать исходя из метеорологических условий района установки и параметров терминалов АОЛС. А_д можно рассчитать по формуле [4]:

$$A_d = 1 - P_{V_{fm}}$$

где P_{V_{fm}} – вероятность снижения МДВ ниже предельной дальности V_{fm}, определяемой запасом усиления оборудования FM на дистанции L (в км).

При этом, V_{fm} (в км) определяется по формуле [4]:

$$V_{fm} = \frac{17}{FM} L,$$

где V_{fm} – предельная дальность в км.

Запас усиления оборудования (FM) является «паспортной» величиной любого терминала АОЛС, и зависит, помимо таких параметров как: общая мощность излучателя, чувствительности приемника и протяжённость трассы, от потерь, обусловленных расходимостью оптического излучения (геометрических потерь).

Потери, обусловленные расходимостью оптического излучения, возникают при распространении сигнала в свободном пространстве от источника к получателю, и обусловлены дифракцией вблизи апертуры приемника, поскольку некоторая часть переданного луча не будет собрана приемником. Расходимость луча является очень важным параметром при проектировании систем АОЛС. В общем случае, предпочтительнее оптический источник с малой расходимостью луча, но, в то же время, диаметр пятна в зоне, нахождения приемника должен быть достаточно большой, чтобы апертура приемника находилась внутри данного пятна при случайных перераспределениях мощности, вызванных турбулентностью атмосферы [35].

В соответствии с описанной методикой оценки доступности АОЛС использовалась программа для ЭВМ «Программный комплекс FSO» [34] для получения зависимостей доступности связи от дистанции (к примеру, изображенные на рис. 8 зависимости доступности от дистанции в регионе расположения Ангарской нефтехимической компании для моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL)) при загруженных параметрах терминалов АОЛС (<https://moctkom.ru/mobile-terminals>) и значений метеорологической дальности видимости (Архив погоды, METAR (rp5.ru)) в период с 2013 по 2024 год, с близлежащих аэропортов для исследуемых районов расположения крупных промышленных и энергетических комплексов.

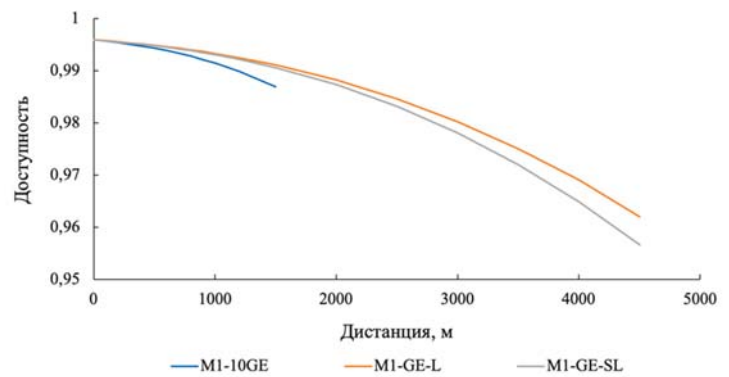


Рис. 9. Зависимости доступности от дистанции в регионе расположения Ангарской нефтехимической компании для моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL)

Полученные диаграммы доступностей терминалов атмосферной связи ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) (<https://moctkom.ru/mobile-terminals>) на дистанции до 1 км в районах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации представлены на рисунках 10-12.

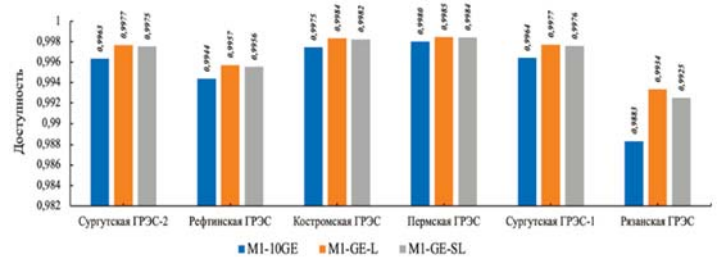


Рис. 10. Диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах расположения ТЭС Российской Федерации

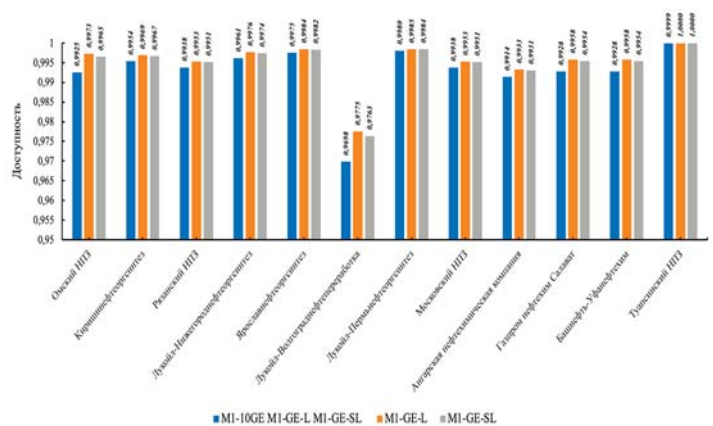


Рис. 11. Диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах расположения НПЗ Российской Федерации

5. Заключение

Таким образом, численное моделирование характеристик работы атмосферной оптической связи с использованием программного комплекса [34] в регионах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации, с учетом архива климатических условий региона за 12 лет и параметров современных российских терминалов атмосферной связи подчеркивает, что технология атмосферной связи обладает высоким потенциалом на таких объектах. Дополнительно следует отметить возможность реализации технологии КРК через терминалы АОЛС, которые серийно производит компания АО МОСТКОМ [37]. Оптические терминалы АОЛС располагаются в зоне прямой видимости, а в силу возможности постоянно визуально контролировать линию оптической трассы, это позволяет регистрировать попытки несанкционированного сбора информации с терминалов и заблаговременно пресекать их, что является дополнительным фактором защиты информации, передаваемой в АОЛС.

Полученные результаты моделирования сеанса связи, для рассматриваемых в статье атмосферных терминалов, позволяют определить, какие из предложенных терминалов атмосферной связи подходят под конкретные условия региона расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации.

Благодарности. Мироновым Ю.Б. работа выполнялась в НИЦ «Курчатовский институт» в рамках государственного задания по теме FNEF-2024-0014.

Литература

1. Антонова В.М., Бужин И.Г., Гайфутдинов Э.А. и др. Система управления трафиком в перспективных мобильных сетях на основе технологий SDN/NFV // Информационные процессы. 2023. Т. 23, № 1. С. 113-125. DOI 10.53921/18195822-2023-23-1-113.
2. Antonova V.M., Buzhin I.G., Gayfutdinov E.A. et al. Traffic Management System in Promising Mobile Networks Based on SDN/NFV Technologies // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Vol. 68, No. 12, pp. 1506-1514. DOI 10.1134/s1064226923120033.
3. Buzhin I., Bessonov M., Mironov Y., Farkhadov M.P. Integrity, Resilience and Security of 5G Transport Networks Based on SDN/NFV Technologies. // In: Vishnevskiy, V.M., Samouylov, K.E., Kozyrev, D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2021. Communications in Computer and Information Science, 2022, Vol 1552. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97110-6_9
4. Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Максимов А.Ю., Пчелкина Н.В. Применения атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики // Успехи прикладной физики, 2023. Т. 11, №6/ С. 530-539. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539>
5. Kazantsev S.Y., Kuznetsov S.N., Maksimov A.Y., Pchelkina N.V. Prospects for the Use of Atmospheric Optical Communication at Nuclear and Fusion Facilities // Fusion Science and Technology. 2024. Vol. 80, No. 7, pp. 893-903. <https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2339662>
6. Buzhin I.G., Derevyankin A.Yu., Antonova V.M. et al. Comparative analysis of the rest and GRPC used in the monitoring system of communication network virtualized infrastructure // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Vol. 17. No. 4, pp. 50-55. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-4-50-55.
7. Buzhin I., Mironov Y., Gorodnichev M., Sheremetev A. Comprehensive Assessment of the Quality of Telecommunication Services of Software-Defined Networks // Lecture Notes in Information Systems and Organisation: 3rd, 2022, pp. 207-219. DOI 10.1007/978-3-030-94252-6_15.

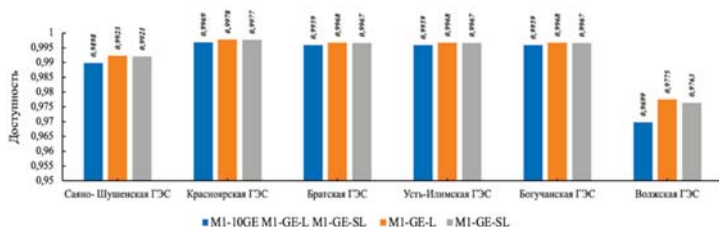


Рис. 12. Диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах расположения ГЭС Российской Федерации

Из рисунков 10-12 получена сводная диаграмма средних доступностей по каждому приемо-передающему терминалу АОЛС ARTOLINK, представленная на рисунке 13.

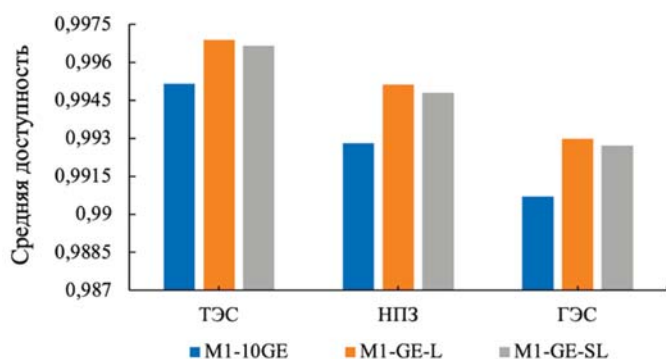


Рис. 13. Диаграмма средних доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL)

Как видно из рисунка 13, для трех моделей АОЛС ARTOLINK (<https://mостком.ru/mobile-terminals>), на дистанции до 1 км, лучший показатель средней доступности у модели ARTOLINK M1-GE-L, минимальное значение которой соответствует исследуемым объектам ГЭС и составляет более 99,3%.

Исходя из рисунков 10-12, можно сделать вывод, что минимальное значение доступности у любых терминалов АОЛС в регионах расположения НПЗ Лукойл-Волгограднефтепереработка и Волжской ГЭС было в районе 97%, поскольку, так как основываясь на рисунках 7-8, в данных регионах параметр МДВ, исходя из статистики за 12 лет, опускался ниже значения 1 км с максимальной вероятностью 4%. Доступность, при использовании терминала ARTOLINK M1-GE-L, в случае остальных районов расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации, превышала 98,8%, что является приемлемым, в соответствии с [36], для использования такого вида канала в качестве резервного, а также для регулярного использования этого типа связи. Стоит отметить, что [36] не является единственным требованием к функционированию сетей связи, заказчики систем связи могут устанавливать к таким системам свои требования, обусловленные различными факторами. К таким факторам могут относиться: планируемая максимальная нагрузка на проектируемую коммуникационную сеть, ее сложность и необходимость повышенной защищенности передаваемой в сети информации, возможность масштабирования данной сети т.п.

Полученные результаты, несомненно, должны учитывать при проектировании сети, с учетом интеграции в нее систем АОЛС, исходя из конкретного региона расположения объекта.

8. *Buzhin I.G., Antonova V.M., Gaifutdinov E.A., Mironov Yu.B.* Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies // *T-Comm*. 2022. Vol. 16, No. 12, pp. 40-45. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-12-40-45
9. *Varlamov O.V., Dymkova S.S.* New Directions and Trends in the Development of Wave Electronics at the International Conference WECONF // *Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 445-449. <https://doi.org/10.1109/WECONF57201.2023.10147930>
10. *Dymkova S.S. and Varlamov O.V.* Scientometric analysis of authors collaborations at the international conference "Engineering Management of Communications and Technologies // 2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2023, pp. 1-4. doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296946.
11. *Алешин В.С.* Оценка реализуемости активной фазированной антенной решётки терминала системы спутниковой связи "Экспресс-РВ" // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2021. Т. 15, № 8. С. 13-21. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-8-13-21.
12. *Bush S.F., Challenger W.A., Mantelet G.* A perspective on industrial quantum networks // *AVS Quantum Science*, 2021. Vol. 3. No. 3. P. 030501. <https://doi.org/10.1116/5.0051881>
13. *Велихов В.Е., Ковальчук М.В., Кулик С.П.* и др. О межвузовской квантовой сети // *Электросвязь*. 2024. № 11. С. 2-11. DOI 10.34832/ELSV.2024.60.11.001
14. *Tang Z., Zhang P., Krawec W. O. and Wang L.* Quantum Networks for Resilient Power Grids: Theory and Simulated Evaluation // *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 2, pp. 1189-1204, March 2023, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3172374>
15. *Paudel H.P., Crawford S.E., Lee Y.-L., Shugayev R.A., Leuenberger M.N., Syamlal M., Ohodnicki P.R., Lu P., Mollot D., Duan Y.* Quantum Communication Networks for Energy Applications: Review and Perspective // *Advanced Quantum Technologies*, 2023. Vol. 6, No. 10. P. 2300096. <https://doi.org/10.1002/qute.202300096>
16. *Kong P.-Y.* A Review of Quantum Key Distribution Protocols in the Perspective of Smart Grid Communication Security // *IEEE Systems Journal*, 2022. Vol. 16, No. 1, pp. 41-54. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3024956>
17. *Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Терехин Д.Н.* Разработка карты применимости атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики Российской Федерации // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2025. Т. 16, № 1. С. 5-12. DOI: 10.56304/S2079562924060162
18. *Боев А.А.*, и др. Возможность построения модульной системы квантового распределения ключей в атмосфере // *Письма в журнал технической физики*. 2022. Т. 48, № 15. 15-18. DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53125.19192
19. *Ерохин К.Ю.*, и др. Применимость технологии квантового распределения ключей в свободной атмосфере при построении сегментов современных квантовых коммуникационных сетей // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91, № 11. С. 63-70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-63-70>
20. *Pchelkina N.V., Zhukovsky D.D., Nanidzhanyan A. K., Bushuev E.Y. and Chizhin D.D.* Investigation of the Atmospheric Optical Disturbances Impact on the Free Space Optics Quantum Key Distribution // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486>
21. *Белова О.С.* и др. Влияние электрического поля от облака заряженного водного аэрозоля на волоконно-оптические линии связи // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2023. Т. 50, № 10. С. 21-28. <https://doi.org/10.3103/S1068335623100032>
22. *Rabenandrasana J., Kolesnikov O.V., Bolotov D.V., Belova O.S. and Temnikov A.G.* The Effect of Pulsed Electromagnetic Fields on the Transmission of Information Over an Optical Cable // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617776>
23. *Белова О.С., Болотов Д.В., Бушуев Э.Ю.*, и др. Влияние атмосферных разрядов на скорость генерации криптографического ключа в системах квантовой коммуникации // *Оптический журнал*. 2025. Т. 92. № 1. С. 13-20. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-01-13-20>
24. *Fahey T. et al.* Laser beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 7. P. 918. <https://doi.org/10.3390/atmos12070918>
25. *Uysal M., Capsoni C., Ghassemlooy Z., Boucouvalas A., Udvary E.*, "Optical Wireless Communications: An Emerging Technology," Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0>
26. *Кузнецов С., Огнев Б., Поляков С.* FSO на последней (и не только) миле. Практические результаты // *Первая миля*. 2009. Т. 10, № 1. С. 30-33.
27. *Пронин А.А., Пчелкина Н.В., Усачев К.П., Чиж С.А.* Перспективы применимости коммерческих атмосферных оптических линий связи // *Сб. тр. XII междунар. конф. по фотонике и информационной оптике*. 1-3 февр. 2023, Москва. 2023. Москва: НИЯУ МИФИ. С. 526-527.
28. *Пронин А.А., Чиж С.А., Пчелкина Н.В.* Исследование возможностей применения атмосферных оптических линий связи в регионах России // *Наука, техника, педагогика в высшей школе: материалы всероссийской научно-практической конференции*, Москва, 20-27 февраля 2023 г. М.: МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ, 2023. С. 569-575.
29. *Земзеев А.Г.*, и др. Разработка карты применимости технологической связи для объектов нефтегазовой отрасли // *Экспозиция Нефть Газ*. 2014. № 5 (37). С. 19-22.
30. *Гришин А.И., Крючков А.В.* Измерения характеристик атмосферы лидарным и нефелометрическими методами // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31, No. 2. С. 156-159. DOI: 10.15372/A0020180212
31. *Хромов С.П., Петросянец М.А.* Метеорология и климатология. М.: Издательство Московского университета, 2012. 584 с.
32. *Григорьев Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л.* Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. Уч. 2012. СПб.: РГГМУ.
33. *Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Никшиков П.Я., Солонин А.С.* Видимость для аэронавигации. Монография, ISBN 978-5-86813-337-4, СПб, 2012, 331с.
34. *Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Терехин Д.Н., Казанцев С.Ю.* Программный комплекс FSO. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024618934. Заявка от 17.04.2024.
35. *Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Огнев Б.И., Паршин А.А.* Снижение уровня ошибок при передаче высокочастотных оптических сигналов в условиях турбулентной атмосферы за счет использования статистики уровня приемного сигнала // *Фотоника*. 2020. Т. 14, № 5. С. 424-437. DOI 10.22184/1993-7296
36. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 25.11.2021 No 1229 "Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования" (Зарегистрирован 28.02.2022 No 67548).
37. *Bolotov D.V.*, et al. Modular Facility of Quantum Key Distribution in a Free Space // 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148017.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATIONS IN LARGE INDUSTRIAL AND ENERGY COMPLEXES OF THE RUSSIAN FEDERATION

Sergey Yur. Kazantsev, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, s.i.kazantsev@mtuci.ru
Maksim V. Sapozhnikov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, m.v.sapozhnikov@mtuci.ru
Yuri B. Mironov, National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia, [ymironov@jssc.ru](mailto:yironov@jssc.ru)
Dmitry N. Terekhin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, o.d.n.terehin@mtuci.ru
Anton V. Burdin, Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I., Saint Petersburg, Russia, bourdine@yandex.ru

Abstract

The concept of implementing hybrid communication lines at industrial and energy complexes of the Russian Federation based on the use of atmospheric optical communication is proposed. Scenarios for deploying a communication network based on the use of atmospheric optical communication line terminals operating in the 1550 nm spectral band are considered. It is shown that significant advances in the development of quantum technologies stimulate research in the field of implementing quantum networks to protect energy grid control systems, for which it is advisable to use hybrid communication lines with data transmission over an optical communication channel, which can be implemented through commercial optical terminals. The possibility of using atmospheric optical communication as a primary and backup channel for data transmission in the regions where large industrial and energy complexes of the Russian Federation are located is analyzed; thermal power plants (TPPs), oil refineries (ORs), and hydroelectric power plants (HPPs) are consistently considered. Based on statistics of climatic conditions in the regions where such facilities are located for 12 years and technical parameters of modern Russian terminals, the efficiency of using optical terminals at large industrial and energy facilities of the Russian Federation is shown.

Keywords: free-space optical communication, atmospheric optical communication lines, quantum key distribution, industrial complex security, energy complex communication technology, communication channel availability.

References

- [1] V. M. Antonova, I. G. Buzhin, E. A. Gayfutdinov et al., "Traffic Management System in Promising Mobile Networks Based on SDN/NFV Technologies," *Information Processes*. 2023. Vol. 23. No. pp. 113-125. DOI 10.53921/18195822_2023_23_1_113.
- [2] V. M. Antonova, I. G. Buzhin, E. A. Gayfutdinov et al., "Traffic Management System in Promising Mobile Networks Based on SDN/NFV Technologies," *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2023. Vol. 68. No. 12, pp. 1506-1514. DOI 10.1134/s1064226923120033
- [3] I. Buzhin, M. Bessonov, Y. Mironov, M. P. Farkhadov, "Integrity, Resilience and Security of 5G Transport Networks Based on SDN/NFV Technologies," *DCCN 2021. Communications in Computer and Information Science*, 2022, vol. 1552. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97110-6_9
- [4] S. Yu. Kazantsev, S. N. Kuznetsov, A. Yu. Maksimov, N. V. Pchelkina, "Applications of atmospheric optical communication at nuclear power facilities," *Uspekhi Prikladnoi Fiziki (Advances in Applied Physics)*. 2023. Vol. 11. No. 6, pp. 530-539. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539>
- [5] S. Yu. Kazantsev, S. N. Kuznetsov, A. Yu. Maksimov, N. V. Pchelkina, "Prospects for the Use of Atmospheric Optical Communication at Nuclear and Fusion Facilities," *Fusion Science and Technology*. 2024. Vol. 80. No. 7, pp. 893-903. <https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2339662>
- [6] I. G. Buzhin, A. Yu. Derevyankin, V. M. Antonova et al., "Comparative analysis of the rest and GRPC used in the monitoring system of communication network virtualized infrastructure," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No. 4, pp. 50-55. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-4-50-55
- [7] I. Buzhin, Y. Mironov, M. Gorodnichev, A. Sheremetev, "Comprehensive Assessment of the Quality of Telecommunication Services of Software-Defined Networks," *Lecture Notes in Information Systems and Organisation: 3rd, Virtual, Online*. 2022, pp. 207-219. - DOI 10.1007/978-3-030-94252-6_15
- [8] I. G. Buzhin, V. M. Antonova, E. A. Gaifutdinov, Yu. B. Mironov, "Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies," *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 12, pp. 40-45. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-12-40-45.
- [9] O. V. Varlamov, S. S. Dymkova, "New Directions and Trends in the Development of Wave Electronics at the International Conference WECONF," *Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. 2023. Vol. 6. No. 1, pp. 445-449. <https://doi.org/10.1109/WECONF57201.2023.10147930>
- [10] S. S. Dymkova, O. V. Varlamov, "Scientometric analysis of authors collaborations at the international conference "Engineering Management of Communications and Technologies", 2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2023, pp. 1-4. doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296946
- [11] V. S. Aleshin, "Evaluation of the feasibility of an active phased array antenna in the terminal of the express-rv satellite communication system," *T-Comm*, 2021. Vol. 15. No.8, pp. 13-21. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-8-13-21 (in Russian)
- [12] S. F. Bush, W. A. Challenger, G. Mantelet, "A perspective on industrial quantum networks," *AVS Quantum Science*, 2021. Vol. 3. No. 3. P. 030501. <https://doi.org/10.1116/5.0051881>
- [13] V. E. Velikhov, M. V. Kovalchuk, S. P. Kulik et al., "The interuniversity quantum network," *Electrosvyaz*. 2024. No 11, pp. 2-11. DOI 10.34832/ELSV.2024.60.11.001
- [14] Z. Tang, P. Zhang, W. O. Krawec, L. Wang, "Quantum Networks for Resilient Power Grids: Theory and Simulated Evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 38, No. 2, pp. 1189-1204, March 2023, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3172374>
- [15] H. P. Paudel, S. E. Crawford, Y.-L. Lee, R. A. Shugayev, M. N. Leuenberger, M. Syamlal, P. R. Ohodnicki, P. Lu, D. Mollot, Y. Duan, "Quantum Communication Networks for Energy Applications: Review and Perspective," *Advanced Quantum Technologies*, 2023. Vol. 6. No. 10. P. 2300096. <https://doi.org/10.1002/qute.202300096>.
- [16] P.-Y. Kong, "A Review of Quantum Key Distribution Protocols in the Perspective of Smart Grid Communication Security," *IEEE Systems Journal*, 2022. Vol. 16, no. 1, pp. 41-54. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3024956>
- [17] S. Yu. Kazantsev, M. V. Sapozhnikov, D. N. Terekhin, "Development of a map of the applicability of atmospheric optical communications at nuclear power facilities in the Russian Federation," *Nuclear Physics and Engineering*. 2025. Vol. 16. No. 1, pp. 5-12. DOI: 10.56304/S2079562924060162

- [18] A. A. Boev, S. S. Vorobey, S. Y. Kazantsev, et al., "Possibility of creating a modular system for quantum key distribution in the atmosphere," *Technical Physics Letters*, 2022. Vol. 48, No. 8, pp. 11-14. <https://doi.org/10.21883/TPL.2022.08.55051.19192>
- [19] K. Yu. Erokhin, S. Yu. Kazantsev, T. V. Kazieva, Yu. B. Mironov, N. V. Pchelkina, "The applicability of quantum key distribution technology in a free atmosphere when constructing segments of modern quantum communication networks," *Opticheskii Zhurnal*. 2024. Vol. 91. No. 11, pp. 63-70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-63-70>
- [20] N. V. Pchelkina, D. D. Zhukovsky, A. K. Nanidzhanyan, E. Y. Bushuev, D. D. Chizhin, "Investigation of the Atmospheric Optical Disturbances Impact on the Free Space Optics Quantum Key Distribution," *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russia, 2024, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486>
- [21] O. S. Belova, et al., "Experimental Study of the Effect of Electric Fields of Thunderclouds on Fiber-Optic Communication Lines," *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2023. Vol. 50, pp. 429-433. <https://doi.org/10.3103/S1068335623100032>
- [22] J. Rabenandrasana, O. V. Kolesnikov, D. V. Bolotov, O. S. Belova, A. G. Temnikov, "The Effect of Pulsed Electromagnetic Fields on the Transmission of Information Over an Optical Cable," *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617776>
- [23] O. S. Belova, D. V. Bolotov, E. Yu. Bushuev, S. E. Grychkin, S. Yu. Kazantsev, T. V. Kazieva, O. V. Kolesnikov, E. P. Stroganova, "The atmospheric discharges influence on the rate of cryptographic key generation in quantum communication systems," *Opticheskii Zhurnal*. 2025. Vol. 92, No. 1, pp. 13-20. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-01-13-20>
- [24] T. Fahey, et al., "Laser beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications," *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 7. P. 918. <https://doi.org/10.3390/atmos12070918>
- [25] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, E. Udvary, "Optical Wireless Communications: An Emerging Technology," Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0>
- [26] S. Kuznetsov, B. Ognev, S. Polyakov, "FSO on the "Last (and not only) mile". Practical results," *Last Mile*. 2009. Vol. 10, No. 1, pp. 30-33. (in Russian)
- [27] A. A. Pronin, N. V. Pchelkina, K. P. Usachev, S. A. Chizh, "Prospects for applicability of commercial atmospheric optical communication lines," *12th Int. Conf. on Photonics and Information Optics*, Moscow, 2023, Ed. by V. G. Rodin. Nats. Issled. Yadernyi Univ. MIFI, Moscow, 2023, p. 526. <https://elibrary.ru/kjztqg>.
- [28] A. A. Pronin, S. A. Chizh, N. V. Pchelkina, "Study of the Possibilities of Using Atmospheric Optical Communication Lines in the Regions of Russia," *Science, Technology, Pedagogy in Higher Education: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*, Moscow, February 20-27, 2023. Moscow: MOSCOW POLYTECH, 2023, pp. 569-575. <https://elibrary.ru/ikopif>. (in Russian)
- [29] A. G. Zebzeev, E. A. Rybakov, D. P. Starikov, A. G. Chernov, "Development of a map of applicability of communication technologies for oil and gas industry facilities," *Ekspozitsiya. Neft'. Gaz*. No. 5, 19. 2014. <https://elibrary.ru/smknpv>. (in Russian)
- [30] A. I. Grishin, A. V. Kryuchkov, "Measuring the characteristics of the atmosphere using lidar and nephelometric methods," *Optics of the atmosphere and ocean*. 2018. Vol. 31. No. 2, pp. 156-159. DOI: 10.15372/A0020180212
- [31] S. P. Khromov, M. A. Petrosyants, "Meteorology and climatology," Moscow: Moscow University Publishing House, 2012. 584 p. (in Russian)
- [32] N. O. Grigorov, A. G. Saenko, K. L. Voskanyan. RGGMU, Uchebnik, 2012. (in Russian)
- [33] T. A. Bazlova, N. V. Bocharnikov, P. Ya. Nikishkov, A. S. Solonin, "Visibility for air navigation," St. Petersburg, 2012, 331 p. ISBN 978-5-86813-337-4. (in Russian)
- [34] M. V. Sapozhnikov, Yu. B. Mironov, D. N. Terekhin, S. Yu. Kazantsev, RF Certificate of State Registration of Software No. 2024618934, Byull. Izobret., No. 4. 2024. <https://elibrary.ru/vudcdd>.
- [35] M. Y. Kernosov, S. N. Kuznetsov, B. I. Ognev, A. A. Parshin, "Reduction of the level of errors in the transmission of high-frequency optical signals in a turbulent atmosphere due to the use of statistics of the received signal level," *Photonics*. 2020. Vol. 14, pp. 424-437. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.424.436>
- [36] Order of the Ministry of Digital Development, Communications, and Mass Media of the Russian Federation of 25.11.2021 No. 1229 On Approval of the Requirements for Organizational and Technical Support of the Stable Functioning of the Public Communications Network, Registered No. 67548 on February 28, 2022. (in Russian)
- [37] D. V. Bolotov, et al., "Modular Facility of Quantum Key Distribution in a Free Space," *2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/WECONF57201.2023.10148017>

Information about authors:

Sergey Yu. Kazantsev, PhD, Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Maksim V. Sapozhnikov, Engineer, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Yuri B. Mironov, PhD, leading engineer, National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia

Dmitry N. Terekhin, degree applicant, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Anton V. Bourdin, PhD, Advisor to the CEO for Innovation, Docent, JSC "Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.", St. Petersburg, Russia

ФАКТОР КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ В РЕАЛИЗАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-31-38

Manuscript received 17 November 2024;
Accepted 25 December 2024

Сивоконь Владимир Павлович,
Институт космофизических исследований и
распространения радиоволн ДВО РАН,
п. Паратунка, Россия;
Камчатский государственный технический
университет, г. Петропавловск-Камчатский, Россия,
vsivokon@mail.ru

Работа выполнена за счет Государственного
задания ИКИР ДВО РАН
(рег. № темы 124012300245-2)

Ключевые слова: модификация ионосферы,
искусственные магнитоориентированные
неоднородности, космическая пыль

Исследования по модификации ионосферы с использованием нагревных стендов включают в себя результаты, которые оказались существенно ниже ожидаемых. Например, задача формирования искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы на основе возбуждения ионосферного волновода, не решена в полной мере. Одной из причин такого расхождения, возможно, является наличие космической пыли в области воздействия на ионосферу. Для проверки этой гипотезы разработан новый метод исследования влияния космической пыли на эксперименты по активному воздействию на ионосферу, в котором использованы результаты исследования, выполненные сторонними организациями на нагревном стенде EISCAT. Нами используется метод многопозиционной диагностики магнитоориентированных неоднородностей на основе технологии SDR (Software Defined Radio) и естественный источник космической пыли - метеорный поток Геминиды. В результате экспериментально показано, что наличие в области активного воздействия на ионосферу космической пыли приводит к изменению характеристик искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы и, следовательно, параметров трансконтинентальных ионосферных каналов связи.

Информация об авторе:

Сивоконь Владимир Павлович, главный научный сотрудник лаборатории "Электромагнитных излучений" Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, п. Паратунка, Россия;
профессор кафедры "Энергетические установки и электрооборудование судов" Камчатского государственного технического университета,
доктор технических наук, доцент, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Для цитирования:

Сивоконь В.П. Фактор космической пыли в реализации глобальных телекоммуникационных систем декаметрового диапазона // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 31-38.

For citation:

V. P. Sivokon, "The cosmic dust factor in the Implementation of global decameter range telecommunication systems," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.1 pp. 31-38. (in Russian)

I. Введение

Одним из направлений исследований активного воздействия на ионосферу является формирование искусственной ионизации и, как частный случай, создание магнитоориентированных неоднородностей электронной концентрации. Подобные неоднородности можно использовать для решения ряда прикладных задач, в том числе для закачки энергии в межслоевой ионосферный волновод, что позволяет реализовать трансконтинентальный канал передачи данных. Однако, как показывают эксперименты [1, 2] и их анализ [3], параметры искусственных магнитоориентированных неоднородностей не в полной мере отвечают ожиданиям экспериментаторов. Одной из причин такого положения дел, возможно, является наличие пыли в области активного воздействия на ионосферу. Исследованию пылевой плазмы уделяется большое внимание [4], что связано с новыми физическими эффектами [5] и её необыкновенными свойствами [6].

Имеются публикации, в которых рассматриваются ионосферные аспекты пылевой плазмы [7, 8]. Эксперименты по изучению влияния пыли на формирование полярного мезосферного летнего эха (PMSE) с использованием нагревного стенда EISCAT описаны в работах [9, 10]. Так в работе [9] предлагается методика исследования пыли в области формирования PMSE. Публикация [10] развивает предложенный в работе [9] метод в условиях низкой солнечной активности. Имеются теоретические работы [11-13], в которых показана возможность модуляционного возбуждения неоднородностей концентрации электронов и ионов в ионосфере. Например, в работе [12] описывается механизм формирования неоднородностей электронной и ионной концентраций в запыленной ионосфере в результате развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн накачки, с участием пылевых звуковых возмущений.

В рамках предложенного метода в качестве примера определены возможные масштабы неоднородностей электронной концентрации в запыленной ионосфере, формирующиеся в результате развития модуляционной неустойчивости в случае монохроматических электромагнитных волн от нагревного стенда HAARP для положительно заряженных пылевых частиц. В развитие публикации [12] в работе [13] акцентируется внимание на диапазоне высот 100-120 км, на которых вероятнее всего будет наблюдаться модуляционное возбуждение неоднородностей ионосферы над нагревным стендом HAARP. Экспериментальных исследований, направленных на оценку влияния пыли на результат активного воздействия на ионосферу с использованием нагревных стендов, выявить не удалось.

Вместе с тем, в публикации [14] показана роль пыли в формировании вихревых структур, которые способствуют усилению турбулентных процессов в плазме, что может сказаться на эффективности функционирования радиотехнических систем. Например, для передачи информации на большие расстояния используется ионосферный волновод. Существует несколько способов его возбуждения [15], в том числе путем формирования искусственных магнитоориентированных неоднородностей [1, 16-18]. В публикации [2] обобщаются результаты экспериментов по реализации нового метода создания глобальных радиолоний с использованием различных нагревных стендов EISCAT (Норвегия), HAARP

(Аляска) и Аресибо (Пуэрто-Рико). Поскольку эти исследования проводились на протяжённых трассах не представляется возможным оценить степень влияния параметров искусственных неоднородностей на свойства канала связи. В рукописи [3] показано, что на индекс мерцаний S_4 ионосферного телекоммуникационного канала влияют свойства искусственных магнитоориентированных неоднородностей, скорости их перемещения, а также фоновые неоднородности электронной концентрации. Наличие пыли может повлиять на формирование искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы, что скажется на свойствах трансконтинентальной радиолонии. Следовательно, задача оценки фактора пыли в экспериментах по активному воздействию на ионосферу является актуальной.

II. Обоснование метода

Для решения поставленной задачи следует рассмотреть существующие способы исследования свойств космической пыли и возможность их использования в нашем случае. В работах [8-10] приводятся результаты исследований пыли проводившихся на высотах 70-90 км (слои D-E), в то время как наши исследования предполагается проводить на высотах слоев F1-F2. Для наблюдений используются УКВ радары, применение которых стало возможным вследствие образования метеоритными потоками ионизированных следов, что неосуществимо в слое F. Непосредственные исследования космической пыли проводятся с использованием датчиков, установленных на высотных геодезических ракетах и искусственных спутниках Земли [19]. Такой подход требует существенных материальных ресурсов, которыми мы не располагаем. Кроме того, большие мощности нагревных стендов формируют в области активного воздействия на ионосферу интенсивные электромагнитные поля, в которых функционирование датчиков вряд ли возможно.

Известно, что в зависимости от размеров частиц пыли её поведение в плазме существенно отличается [20]. Так в случае очень малых частиц меньше 10^{-6} см, она является частью плазмы. Если пыль при этом движется, то это приводит к дополнительному импульсу плазмы, и, предположим, искусственных неоднородностей ионосферы. Источником такой движущейся пыли могут быть метеорные потоки. Из публикаций по метеорному потоку Геминиды известно, что большую его часть составляют малые частицы [21]. Кроме того, в работе [22] показана возможность дифференциации наблюдений по размерам метеоритов, что позволяет компенсировать ошибку наблюдений в случае попадания в область активного воздействия крупных объектов, входящих в состав метеорного потока.

В предлагаемом методе оценки фактора космической пыли используется одно из свойств метеорного потока, а именно вариационного угла наблюдения обусловленное вращением Земли. Для получения необходимой информации используется способ многопозиционной регистрации рассеянного нагревного излучения [23], в котором используется технология SDR. Приемники SDR имеют принципиальное отличие от обычных радиоприемников, как в части реализации, так и доступа к ним. В этой технологии сигнал, поступающий из антенны, подвергается дискретизации, и дальнейшая его обработка происходит в цифровом виде.

При меньшей чувствительности SDR-приемников, технология позволяет установить одинаковый коэффициент усиления приемного тракта нескольких приемников, находящихся в разных пунктах. Безусловным достоинством технологии является дистанционный доступ и управление приемником, запись сигнала в формате “wave” с последующим его скачиванием. Из этих записей с использованием анализатора спектра получаем информацию об амплитуде и частоте рассеянной нагревной волны. Для повышения стабильности частоты приёмника используется режим USB – однополосная модуляция верхней боковой полосы. Для проверки стабильности частоты и отсутствия нелинейности приемников используются сигналы передатчика точного времени RWM, расположенного в Москве.

Следовательно, мы можем выбрать пару пунктов наблюдения, для которых направление движения метеорного потока будет в одном случае квазипродольным, а в другом квазипоперечным. Тогда, эффект Доплера, обусловленный наличием движущейся пыли в области активного воздействия на ионосферу, будет постоянно наблюдаться в первом случае, и исчезать при поперечном движении метеорного потока во втором случае.

Как и в любом ионосферном эксперименте существенна роль геофизической обстановки. Поскольку перед нами стоит задача оценить влияние космической пыли на искусственные неоднородности ионосферы, наличие естественных неоднородностей должно быть минимальным, что возможно при спокойном магнитном поле Земли [24].

Определенное значение имеет и величина плазменной частоты. При активном воздействии на ионосферу, как правило, используют или гибридную частоту

$$f_{\text{гир}} = \sqrt{f_p^2 + f_g^2}$$

или гармонику гиромангнитной частоты.

$$f_{\text{гарм}} = n f_g$$

где f_p – плазменная частота, f_g – гиромангнитная частота, n – номер гармоники гиромангнитной частоты. В случае, когда плазменная частота штатным ионозондом нагревного стенда не определяется, можно сделать вывод об однозначном использовании в эксперименте гармоники гиромангнитной частоты. Исходя из зависимости гиромангнитной частоты от величины индукции магнитного поля Земли можно определить высоту наибольшей интенсивности воздействия. Кроме того, в случае низкой электронной концентрации повышается вероятность наличия в зоне воздействия именно искусственных неоднородностей электронной концентрации.

Таким образом, для успешной реализации предлагаемого метода необходимо проведение нагревных экспериментов в момент прохождения Земли через метеорный поток в условиях спокойного магнитного поля Земли и минимуме электронной концентрации ионосферы в месте расположения нагревного стенда.

III. Апробация метода

В ноябре 2021 года на сайте EISCAT [25] появилась информация о том, что 14 декабря 2021 года состоится эксперимент «RadardetectionofmeteorsfromtheGeminidmeteorshoweralongwi

thartificialheating». В описании заявки на эксперимент указывалось, что в нём будет использоваться УКВ-радар и нагревной стенд EISCAT для наблюдения за метеоритами из метеорного потока Геминиды. Сообщалось, что эксперимент планируется провести 14 декабря с 00 до 06 UT с частотой нагревной волны 5423 кГц. Нагрев будет производиться по схеме: 2 минуты нагрев - 2 минуты пауза.

Экспериментаторы предполагали, что такое воздействие должно повысить эффективность УКВ радаров на высотах 90-100 км. Используя модель магнитного поля Земли IGRF-13 университета Киото [26] можно показать, что частота 5423 кГц является четвёртой гармоникой гиромангнитной частоты для высоты 241 км. Этот номинал частоты использовался ранее при проведении экспериментов на нагревном стенде EISCAT [27] и позиционировался именно как четвертая гармоника гиромангнитной частоты. В работе, в частности, приводится высотное-временное распределение электронной концентрации и температуры электронов, максимумы которых приходятся на высоты 220-250 км, что хорошо коррелирует с высотой определённой нами с использованием модели IGRF-13.

Можно ожидать, что в случае, когда плазменная частота во время проведения эксперимента будет мала, либо вовсе не будет определяться, вариант реализации гибридной частоты исключается. Это обстоятельство свидетельствует о применении четвертой гармоники гиромангнитной частоты, что в свою очередь позволяет достаточно точно локализовать область максимального проявления активного воздействия на ионосферу на высоте около 240 км. Тщательный подход к определению высоты воздействия необходим по следующей причине. Для оценки параметров искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы нами используется метод, основанный на регистрации резонансного, а не ракурсного рассеяния нагревной волны. Следовательно, при выборе пунктов наблюдения расстояние до них должно быть выбрано с расчётом их нахождения в пунктах, где регистрируется резонансное рассеяние.

Наличие искусственных магнитоориентированных неоднородностей подтверждается работой [28], в которой описывается серия экспериментов, проводившихся на нагревном стенде EISCAT, в том числе, на наблюдаемой нами частоте 5423 кГц. В другой публикации [29] показано, что при использовании частоты нагревной волны, значительно превышающей критическую частоту слоя F2, меняется степень проявления эффектов присущих подобным экспериментам, но не их характер.

С момента получения информации о конкретном метеорном потоке стала актуальной задача выбора пунктов регистрации рассеянного нагревного излучения. Данные о траектории движения метеорного потока Геминиды были получены из Московского планетария, что позволило перейти к выбору пунктов наблюдения. В используемом методе регистрации рассеянного нагревного излучения [23] используются SDR приемники сети Kiwi [30].

При достаточной насыщенности ими европейской части континента, только часть из них пригодна для решения поставленной задачи, поскольку они должны находиться в пределах прямой видимости области воздействия на ионосферу (Тромсе) и обладать высокой стабильностью частоты.

Для реализации нашего подхода одна трасса должна быть квазипродольной, а вторая квазипоперечной относительно

движения метеорного потока Геминиды. Имеется ещё одна особенность использования таких частных приёмников: количество слотов доступа и на какое время они доступны.

Из имеющихся на момент проведения эксперимента в сети приемников наиболее пригодными оказались расположенные в Arctic Kongsfjorden (Норвегия) [31] и Kokkola (Финляндия) [32]. На рисунке 1 в масштабе показано расстояние между Тромсе и пунктами наблюдения, которые составляют соответственно 390 и 630 км.

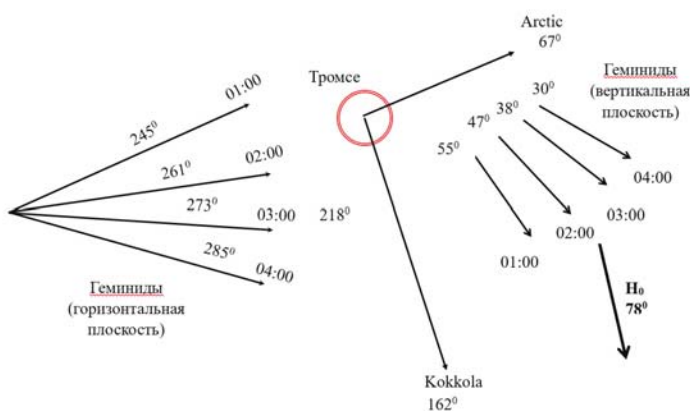


Рис. 1. Геометрия эксперимента

Область воздействия показана кругом с радиусом, соответствующим уровню половинной мощности антенны нагревного стенда на высоте 241 км. Оба пункта наблюдения находятся в пределах прямой видимости из области активного воздействия. На рисунке показаны азимуты из Тромсе на точки приема и изменение траектории движения метеорного потока Геминиды во время проведения эксперимента. Время указано мировое. Поскольку нами исследуется влияние космической пыли на магнитоориентированные неоднородности на рисунке показано наклонение магнитного поля Земли для Тромсе. Из рисунка следует, что траектория метеорного потока в вертикальной плоскости в разные промежутки времени близка к квазипродольной.

В горизонтальной плоскости для трассы Тромсе-Arctic во всё время проведения эксперимента направление движения метеорного потока будет продольным или квазипродольным. Для трассы Тромсе-Kokkola этот параметр будет квазипоперечным, а в интервале времени 01-02 UT можно ожидать что он будет поперечным, и соответствует условию отсутствия регистрации эффекта Доплера, обусловленного движущейся космической пылью.

Геофизическая обстановка во время проведения эксперимента характеризуется спокойным магнитным полем Земли, магнитный индекс $K=1$ [33]. Электронная концентрация во всех слоях ионосферы в период с 01:00 до 01:45 UT была низкой, так что на ионограммах станции DPS-4 Тромсе $f_0F_2, f_0F_1, f_0E, f_{min}$ не фиксируются [34]. В одном измерении в 02:00 UT $f_0F_2 = 4$ МГц, $f_{min} = 3,55$ МГц. Однако это измерение находится вне пределов анализируемого интервала времени. Таким образом, геофизическая обстановка является оптимальной для реализации нашего подхода, что позволяет считать, что неоднородности в области активного воздействия на ионосферу будут преимущественно искусственные,

а влияние естественных неоднородностей на ход эксперимента минимальным.

При проведении нагревного эксперимента отмечено некоторое отступление от заявленной схемы. Нагрев производился в течение четырех минут при двухминутной паузе и начался около часа и закончился к четырем часам мирового времени. Использовалась заявленная частота нагревной волны 5423 кГц, что, как нами отмечалось ранее, соответствует четвертой гармонике гиромангнитной частоты для высоты 241 км.

Запись производилась блоками по четыре минуты, с последующим скачиванием. Доступ к приёмнику Arctic Kongsfjorden был возможен протяжении всего эксперимента. Работа с приемником Kokkola была возможна с 01:00 до 01:45 и затем с 02:18 до 03:00 UT по причине ограниченности доступа.

Полученные в формате wave файлы обрабатывались и вначале строились волновые формы сигнала с тем, чтобы определить наличие длительных возмущений, которые могут быть обусловлены крупными фрагментами метеорного потока [22]. После чего определялось распределение скоростей исходя из доплеровского сдвига частоты. В качестве примера такое распределение в начале нагревного эксперимента показано на рисунке 2.

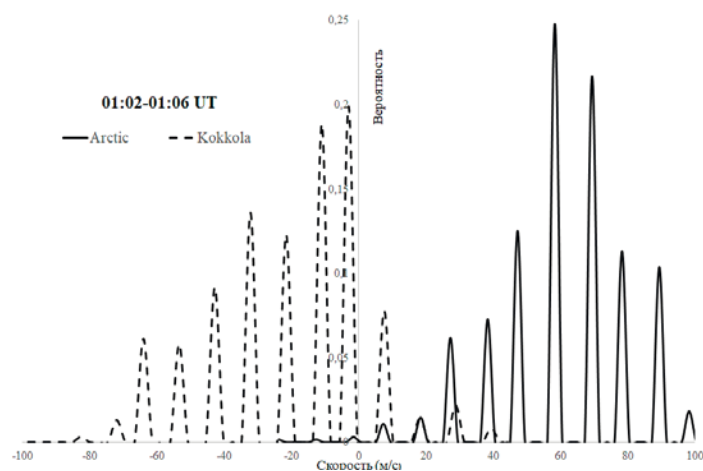


Рис. 2. Распределение скоростей в нагревном цикле 01:02-01:06 UT

Распределение скоростей имеет определенные дискретные значения. Максимальный шаг изменения скорости для Arctic равен 11,1 м/с, а для Kokkola 10,6 м/с, при том, что рассеянное излучение фиксируется из разных областей воздействия (рис. 1). Это может свидетельствовать о некотором общем начале наблюдаемых процессов, которое вероятно всего является движущейся через область воздействия космической пылью. Прогнозируемый эффект отсутствия эффекта Доплера при поперечном движении метеорного потока, по отношению к трассе распространения рассеянного нагревного излучения Тромсе-Kokkola, обнаружился в нагревном цикле 01:32-01:36.

Для наглядности на одном рисунке приводится распределение скоростей для нагревных циклов 01:26-01:30, 01:32-01:36 и 01:38-01:42 (рис. 3). Масштаб скоростей на рисунке увеличен по сравнению с рис.2 с тем, чтобы показать их существенное изменение в интервале времени 01:32-01:36. Во время нагрева в интервалах 01:26-01:30 и 01:38-01:42 UT

распределения скоростей имеют схожие структуры и принципиально не изменились по сравнению с аналогичными распределениями в начале эксперимента (рис. 2). В цикле нагрева 01:32-01:36 распределение скоростей для пункта наблюдения Arctis не претерпело существенных изменений, а для трассы Kokkola оно изменилось кардинальным образом. Следовательно, наличие пыли в области активного воздействия на ионосферу влияет на динамические характеристики магнитоориентированных неоднородностей.

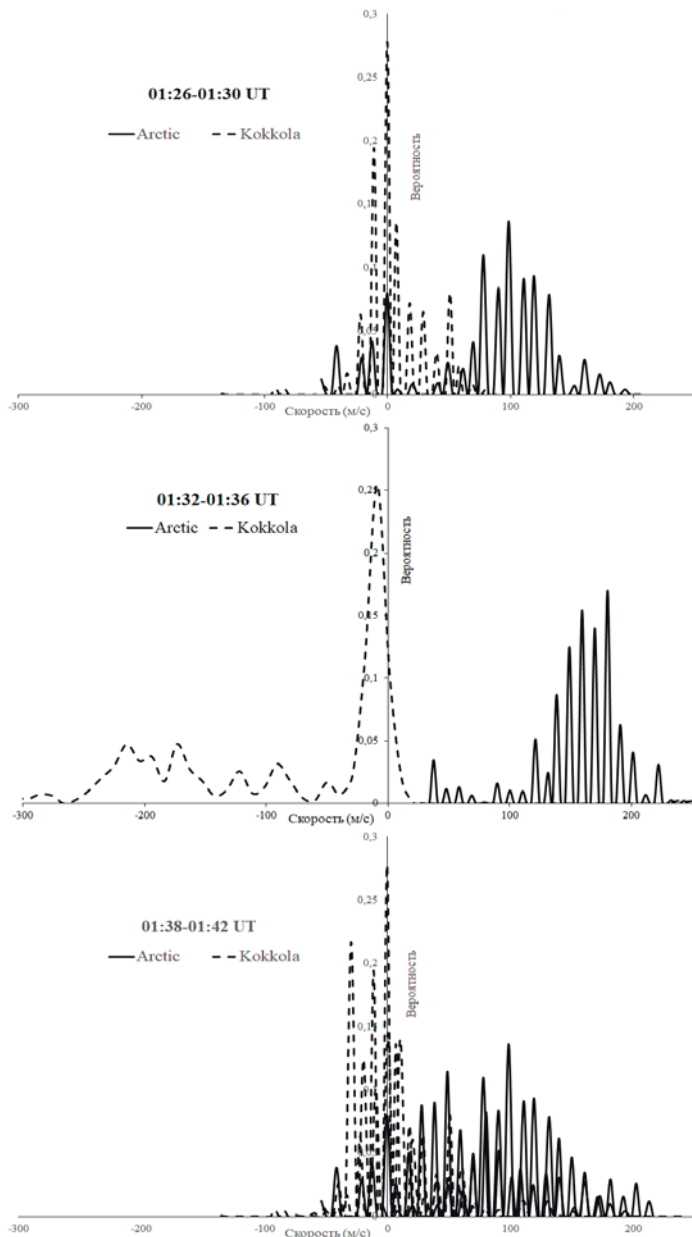


Рис. 3. Распределение скоростей в интервале времени 01:26-01:42 UT

В ходе наблюдений использовался метод [23] который позволяет определить средний размер отдельных магнитоориентированных неоднородностей, величины которых сопоставимы с длиной волны нагревного излучения. Наблюдения дают основания полагать, что скорости, приводимые в рукописи характерны для неоднородностей размером около 47 м.

Степень влияния космической пыли метеорного потока на скорости искусственных магнитоориентированных неоднородностей можно оценить, используя в качестве реперного интервал времени 01.26-01.32 UT, когда это влияние минимально, как следствие перпендикулярного движения потока относительно трассы Tromse-Kokkola. Исходя из такого подхода относительное приращение скорости для направления Kokkola составляет от 32 до 74 м/с.

В немногочисленных публикациях, посвященных исследованию запыленной плазмы в области активного воздействия на ионосферу, исследуется влияния пыли на формирование полярного мезосферного летнего эха [9] и вариации электронной концентрации [35]. Вместе с тем в публикациях [11, 36] показано, что в неустойчивой плазме возможна генерация плазменных вихрей. Можно ожидать, что в спектре наблюдаемого нами излучения, при наличии плазменного вихря, должно присутствовать распределение скоростей и амплитуд, характерное для вихревых структур. Исследуя спектральные характеристики рассеянной нагревной волны, удалось выявить структуры, имеющие центральную (большей амплитуды) и две боковые частоты (меньшей амплитуды) расположенные симметрично относительно первой. При пересчете доплеровского сдвига частоты в скорость, для наблюдательных пунктов Arctis Kokkola в нагревном цикле 01:02-01:06, такие структуры выглядят, как показано на рисунке 4.

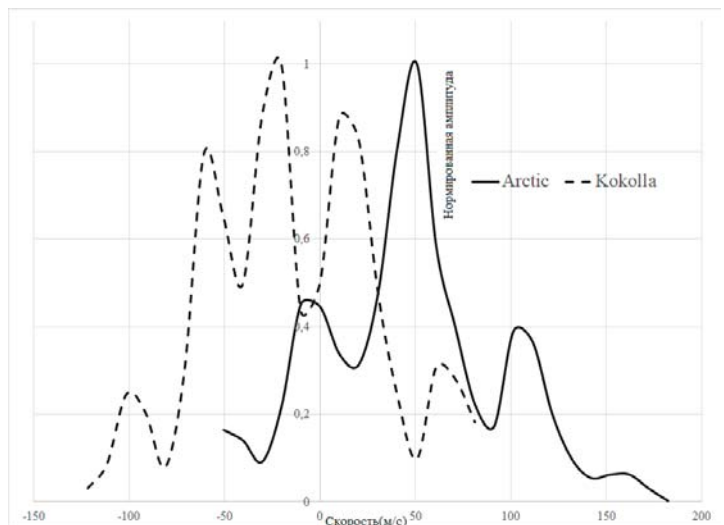


Рис. 4. Спектр участка записи в нагревном цикле 01:02-01:06

Если главные максимумы распределения принять за скорость дрейфа вихря, то боковые составляющие могут нести информацию о скорости движения магнитоориентированных неоднородностей в вихре. Таким образом, для направления Arctis скорость дрейфа вихря составляет 50 м/с, а скорость движения неоднородностей в вихре 61 м/с. Для направления Kokkola они соответственно будут равны 20 и 30 м/с.

Из структуры вихрей следует, что в данном случае вероятнее всего наблюдаются радиально-баллонные вихри [37]. В этой же работе делается вывод о том, что подобные вихревые структуры могут играть важную роль в процессе переноса тепла и частиц и тем самым служить структурными элементами сильной дрейфовой турбулентности, что с большой вероятностью приведёт к потерям энергии нагревной волны.

Выводы

1. Наличие космической пыли в области активного воздействия на ионосферу приводит:

– к существенному изменению динамических характеристик искусственных магнитоориентированных неоднородностей электронной концентрации, что способно влиять на помехоустойчивость трансконтинентального канала связи;

– потерям энергии нагревной волны вследствие формирования вихревых структур, что уменьшает эффективность зачатки информационного сигнала в межслоевой ионосферной волновод.

2. Разработанный метод позволяет проводить исследования влияния космической пыли на ход экспериментов по активному воздействию на ионосферу с использованием естественных источников космической пыли, что даёт возможность проводить опыты без существенных экономических затрат, например на запуск ракет в область воздействия.

3. Проведение нагревных экспериментов синхронизированных с прохождением метеорных потоков может дать новые сведения о структуре метеорных потоков.

Благодарности

Автор выражает признательность д.ф.-м.н. Рябовой Г.О. (НИИ ПММ Томского государственного университета) за полезное обсуждение свойств метеорного потока Геминиды, а также Кошман Л.А. (Московский Планетарий) за предоставление пространственных данных о нем.

Литература

1. Galushko V.G., Bezrodny V.G., Koloskov A.V., et al. HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere. *Radio science*. Vol. 48, 2013, pp. 180-189. Doi:10.1029/2012RS005072.
2. Yampolski Y., Milikh G., Zalizovski A. et al. Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation // *Front. Astron. Space Sci.* Vol. 6. 2019. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00012>
3. Сивоконь В.П. Оценка индекса мерцаний S4 в трансконтинентальных декаметровых радиолниях // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. Т. 17. №5. 2023. С. 14-24.
4. Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. и др. Пылевая плазма // *Успехи физических наук*. Т. 174. 2004. С. 495-544.
5. Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // *Успехи физических наук*. Т. 167. 1997. С. 57-99.
6. Фортвов В.Е., Ваулина О.С., Петров О.Ф., и др. Динамика макрочастиц в пылевой плазме в условиях микрогравитации // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. Т. 123. № 4. 2003. С. 798-815.
7. Kopnin S.I., Popel S.I., Morozova T.I. Modulational excitation of inhomogeneities in dusty ionospheric plasma // *Plasma Physics Reports*. Vol. 41. № 2, pp. 171-177. 2015.
8. Mann I., Gunnarsdottir T., Häggström I. et al. Radar studies of ionospheric dusty plasma phenomena // *Contributions to Plasma Physics*. Vol. 59. e201900005. 2019.
9. Mahmoudian A., Kosch M., Vierinen J. et al. New Technique for Investigating Dust Charging in the PMSE Source Region // *Geophysical Research Letters*. Vol. 47. Doi: 10.1029/2020GL089639.2020.
10. Gunnarsdottir T.L., Poggenpohl A., Mann I., et al. Modulation of polar mesospheric summer echoes (PMSEs) with high-frequency heating during low solar illumination // *Ann. Geophys.* Vol. 41. 2023, pp. 93-114.
11. Izvekova Yu., Popel S. Nonlinear Wave Structures and Plasma-Dust Effects in the Earth's Atmosphere // *Plasma Physics Reports*. Vol. 44, 2018, pp. 835-839.
12. Борисов Н.Д., Копнин С.И., Морозова Т.И., Попель С.И. О роли соударений с нейтралами в процессе модуляционного возбуждения

пылевых звуковых возмущений в запыленной ионосфере // *Физика плазмы*. Т. 45. № 4. 2019. С. 346-352.

13. Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I., Borisov N.D. Some aspects of modulational interaction in Earth's dusty ionosphere // *Physics of Plasmas*. Vol. 28. №3. 2021. P. 033703.

14. Sodha M., Mishra S. Modification of electron density in F layer of ionosphere by dust suspension // *Physics of Plasmas*. Vol. 24. 043705. 10.1063/1.4979988.2017.

15. Гуревич А.В., Цедиллина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979. 246 с.

16. Zalizovski A.V., Kashcheyev S.B., Yampolski Y.M., et al. Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence. *Radio science*. Vol. 44, RS3010, 2009, doi:10.1029/2008RS004111.

17. Безродный В.Г., Галушко В.Г., Райниш Б.В. Ракурсное рассеяние ВЧ радиоволн на магнитоориентированных неоднородностях плоскостойкой ионосферы // *Радиофизика и радиоастрономия*. Т. 16. №1. 2011. С. 33-42.

18. Галушко В.Г., Безродный В.Г., Колосков А.В., и др. О возможном механизме «эффекта саморассеяния» мощных ВЧ сигналов в ионосфере // *Радиофизика и радиоастрономия*. Т. 17. № 2. 2012. С. 112-124.

19. Zook H.A. Spacecraft Measurements of the Cosmic Dust Flux // *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*, pp. 75-92. 2001.

20. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. М.: Мир, 1979. 511 с.

21. Ryabova G.O. A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 456. № 1. 2016. С. 78-84.

22. Андреев Г.В. Епишова А.Е., Рубцов Л.Н., и др. Структура метеорного потока Геминид 1966-1967 гг. по радионаблюдениям на $\lambda = 17$ м. // *Астрономия и геодезия*. Томск. Вып. 9. 1981. С. 81-93.

23. Сивоконь В.П. Новый метод исследования магнитоориентированных неоднородностей ионосферы с использованием программы определения радиосистем // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 60. № 2. 2020. С. 242-249.

24. Сивоконь В.П., Дружин Г.И. Геомагнитный фактор Dst-вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 46. № 4. 2006. С. 521-524.

25. <https://portal.eiscat.se/schedule/comment.cgi?fileName=20211214124973&Start=0000&End=0600>

26. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>

27. Борисова Т.Д., Благовецкая Н.Ф., Калишин А.С., и др. Явления в высокоширотной F-области ионосферы, возникающие при её нагреве излучением с частотой вблизи четвертой гармоники гиро частоты электронов // *Известия вузов. Радиофизика*. Том LVII, № 1. 2014. С. 1-22.

28. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., et al. Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave. *Geophysical research letters*. Vol. 38, L08802, 2011, doi: 10.1029/2011GL046724

29. Blagoveshchenskaya N.F., Kalishina A.S., Borisova T.D., et al. Phenomena in the High-Latitude F Region of the Ionosphere under the Effect of Powerful HF Radio Waves at Frequencies above the Critical One of the F2 Layer. *Geomagnetism and Aeronomy*. Vol. 63. No. 6, 2023, pp. 757-769.

30. <http://kiwisdr.com/public/>

31. <http://arcticsdr.ddns.net:8073/?f=7158.0lsbz6>

32. <http://kiwisdr.oh6ai.fi:8073/?f=14100>

33. <https://flux.phys.uit.no/Kindice/>

34. <http://www.tgo.uit.no>

35. Mahmoudian A., Scales W.A. Temporal evolution of radar echoes associated with mesospheric dust clouds after turn-on of radio wave heating // *J. Geophys. Res.* Vol. 117 D06221. doi:10.1029/2011JD017166.2012

36. Ижовкина Н.И. Взаимодействие вихревых структур в неустойчивой ионосферной плазме // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 53. № 3, 2013. С. 345-353.

37. Абурджания Г.Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2006. 325 с.

THE COSMIC DUST FACTOR IN THE IMPLEMENTATION OF GLOBAL DECAMETER RANGE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Vladimir P. Sivokon, *Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia;*

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, vsivokon@mail.ru

Abstract

Studies on ionosphere modification using heating facilities include results that turned out to be significantly lower than expected. For example, the problem of forming artificial field-aligned irregularity based on excitation of an ionospheric waveguide has not been fully solved. One of the reasons for such a discrepancy may be the presence of cosmic dust in the area of ionospheric impact. To test this hypothesis, a new method for studying the influence of cosmic dust on experiments on active impact on the ionosphere has been developed, which uses the results of research carried out by third-party organizations on the EISCAT heating facility. We use the method of multi-position diagnostics of field-aligned irregularity based on SDR (Software Defined Radio) technology and a natural source of cosmic dust - the Geminid meteor shower. As a result, it was experimentally shown that the presence of cosmic dust in the area of active influence on the ionosphere leads to a change in the characteristics of artificial field-aligned irregularity of the ionosphere and, consequently, the parameters of transcontinental ionospheric communication channels.

Keywords: *modification of the ionosphere, artificial magnetically oriented irregularities, cosmic dust*

References

- [1] V. G. Galushko, V. G. Bezrodny, A. V. Koloskov, et al., "HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere. *Radio science*," 2013. Vol. 48, pp. 180-189. doi:10.1029/2012RS005072
- [2] Y. Yampolski, G. Milikh, A. Zalizovski, et al., "Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation," *Front. Astron. Space Sci.*, 2019. Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00012>.
- [3] V. P. Sivokon, "Estimation of the S4 scintillation index in transcontinental decameter radio links," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No. 5, pp. 14-24.
- [4] V. E. Fortov, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, et al., "Dusty plasma," *Advances in Physical Sciences*. 2004. Vol. 174, pp. 495-544.
- [5] V. N. Tsytoich, "Plasma-dust crystals, drops and clouds," *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1997. Vol. 167, pp. 57-99.
- [6] V. E. Fortov, O. S. Vaulina, O. F. Petrov, et al., "Dynamics of macroparticles in dusty plasma under microgravity conditions," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2003. Vol. 123. No. 4, pp. 798-815.
- [7] S. I. Kopnin, S. I. Popel, T. I. Morozova, "Modulational excitation of inhomogeneities in dusty ionospheric plasma," *Plasma Physics Reports*. 2015. Vol. 41. No. 2, pp. 171-177.
- [8] I. Mann, T. Gunnarsdottir, I. Haggstrom, et al., "Radar studies of ionospheric dusty plasma phenomena," *Contributions to Plasma Physics*, 2019. Vol. 59. e201900005.
- [9] A. Mahmoudian, M. Kosch, J. Vierinen, et al., "New Technique for Investigating Dust Charging in the PMSE Source Region," *Geophysical Research Letters*. Vol. 47. 10.1029/2020GL089639.2020
- [10] T. L. Gunnarsdottir, A. Poggenpohl, I. Mann, et al., "Modulation of polar mesospheric summer echoes (PMSEs) with high-frequency heating during low solar illumination," *Ann. Geophys*. 2023. Vol. 41, pp. 93-114.
- [11] Yu. Izvekova, S. Popel, "Nonlinear Wave Structures and Plasma?Dust Effects in the Earth's Atmosphere," *Plasma Physics Reports*. 2018. Vol. 44, pp. 835-839.
- [12] N. D. Borisov, S. I. Kopnin, T. I. Morozova, S. I. Popel, "On the role of collisions with neutrals in the process of modulation excitation of dust sound disturbances in the dusty ionosphere," *Plasma Physics*. 2019. Vol. 45. No. 4, pp. 346-352.
- [13] T. I. Morozova, S. I. Kopnin, S. I. Popel, N. D. Borisov, "Some aspects of modulational interaction in Earth's dusty ionosphere," *Physics of Plasmas*. 2021. Vol. 28. No.3. P. 033703.
- [14] M. Sodha, S. Mishra, "Modification of electron density in F layer of ionosphere by dust suspension," *Physics of Plasmas*. 2017. Vol.24. 043705. 10.1063/1.4979988
- [15] A. V. Gurevich, E. E. Tsedilina, "Ultra-long-range propagation of short radio waves," Moscow: Nauka, 1979. 246 p.
- [16] A. V. Zalizovski, S. B. Kashcheyev, Y. M. Yampolski, et al., "Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence," *Radio science*, 2009. Vol. 44, RS3010, doi:10.1029/2008RS004111
- [17] V. G. Bezrodny, V. G. Galushko, B. V. Rainish, "Aspect scattering of HF radio waves on magnetically oriented irregularities of the flat-layered ionosphere," *Radiophysics and Radio Astronomy*. 2011. Vol. 16. No. 1, pp. 33-42.

- [18] V. G. Galushko, V. G. Bezrodny, A. V. Koloskov, et al., "On the possible mechanism of the "self-scattering effect" of powerful HF signals in the ionosphere," *Radiophysics and Radio Astronomy*. 2012. Vol. 17. No. 2, pp. 112-124.
- [19] H. A. Zook, "Spacecraft Measurements of the Cosmic Dust Flux," *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*. 2001, pp. 75-92.
- [20] H. Alven, G. Arrhenius, "Evolution of the Solar System," Moscow: Mir, 1979. 511 p.
- [21] G. O. Ryabova, "A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. Vol. 456. No. 1. C. 78-84.
- [22] G. V. Andreev, A. E. Epishova, L. N. Rubtsov, et al., "Structure of the Geminid meteor shower of 1966-1967 based on radio observations at $\lambda = 17$ m," *Astronomy and Geodesy*. Tomsk. 1981. Issue 9, pp. 81-93.
- [23] V. P. Sivokon, "New method for studying magnetically oriented ionospheric irregularities using a radio system identification program," *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. Vol. 60. No. 2, pp. 242-249.
- [24] V. P. Sivokon, G. I. Druzhin, "Geomagnetic factor of Dst variations in selective excitation of ionospheric characteristic waves," *Geomagnetism and Aeronomy*. 2006. Vol. 46. No. 4, pp. 521-524.
- [25] <https://portal.eiscat.se/schedule/comment.cgi?fileName=20211214124973&Start=0000&End=0600>
- [26] <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>
- [27] T. D. Borisova, N. F. Blagoveshchenskaya, A. S. Kalishin, et al., "Phenomena in the high-latitude F-region of the ionosphere arising from its heating by radiation with a frequency near the fourth harmonic of the electron gyrofrequency," *Bulletin of Universities. Radiophysics*. 2014. Vol. LVII, No. 1, pp. 1-22.
- [28] N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, T. K. Yeoman, et al., "Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave," *Geophysical research letters*. 2011. Vol. 38, L08802, doi:10.1029/2011GL046724.
- [29] N. F. Blagoveshchenskaya, A. S. Kalishina, T. D. Borisova, et al., "Phenomena in the High-Latitude F Region of the Ionosphere under the Effect of Powerful HF Radio Waves at Frequencies above the Critical One of the F2 Layer," *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023. Vol. 63. No. 6, pp. 757-769.
- [30] <http://kiwisdr.com/public/>
- [31] <http://arcticsdr.ddns.net:8073/?f=7158.0lsbz6>
- [32] <http://kiwisdr.oh6ai.fi:8073/?f=14100>
- [33] <https://flux.phys.uit.no/Kindice/>
- [34] <http://www.tgo.uit.no>
- [35] A. Mahmoudian, W. A. Scales, "Temporal evolution of radar echoes associated with mesospheric dust clouds after turn-on of radio wave heating," *J. Geophys. Res.*, 2012. Vol. 117 D06221. doi:10.1029/2011JD017166
- [36] N. I. Izhovkina, "Interaction of vortex structures in unstable ionospheric plasma," *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53. No. 3, pp. 345-353.
- [37] G. D. Aburjania, "Self-organization of nonlinear vortex structures and vortex turbulence in dispersing media," Moscow: URSS: LENAND, 2006. 325 p.

Information about author

Vladimir P. Sivokon, Chief researcher of the laboratory of "Electromagnetic radiation" of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia;
Professor of the Department of "Power Installations and Electrical Equipment of Ships" of Kamchatka State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАНЕЛЬНЫХ АНТЕНН С УМЕНЬШЕННЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ И НАКЛОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ НА ОБЪЕКТАХ УКВ РАДИОВЕЩАНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-39-50

Manuscript received 03 November 2024;

Accepted 113 December 2024

Шустерман Феликс Давидович,
Российская телевизионная и радиовещательная сеть,
Москва, Россия, FShusterman@rtrn.ru

Варламов Олег Витальевич,
Московский технический университет связи и
информатики, Москва, Россия, vov@mtuci.ru

Ключевые слова: цифровое радиовещание,
FM-радиовещание, панельная антенна, диаграмма
направленности, уменьшенный рефлектор,
наклонная поляризация

При необходимости увеличения числа транслируемых каналов или перспективном переходе на цифровое радиовещание требуется размещение дополнительных антенных систем на существующей вещательной инфраструктуре (мачтах и башнях), которая изначально не была для этого предназначена. Места для установки дополнительных антенн в ряде случаев оказываются "не удобными" с электромагнитной точки зрения. Так, на призме большого сечения при использовании антенн с только вертикальной или только горизонтальной поляризацией при разумных затратах, глубокие многочисленные провалы в диаграмме направленности более 20 дБ становятся неизбежными. В настоящей статье на основании проводимого электромагнитного анализа рассматриваются причины возникновения проблемных ситуаций и предлагаются систематизированные решения по их преодолению для призм различного сечения с различными вариантами установки - на поясах и на гранях башни, в том числе с рефлекторами уменьшенного размера. Предлагаемое использование антенн с наклонной поляризацией и чередующимся направлением наклона позволяет снизить неравномерность диаграммы направленности до 4...5 дБ при использовании стандартных рефлекторов и до 6...7 дБ при использовании более технологичных и экономичных рефлекторов уменьшенного размера.

Информация об авторах:

Шустерман Феликс Давидович, Начальник отдела Департамента радиовещания и радиосвязи РТРС, Москва, Россия

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:

Шустерман Ф.Д., Варламов О.В. Использование панельных антенн с уменьшенными рефлекторами и наклонной поляризацией на объектах УКВ радиовещания // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 39-50.

For citation:

F. D. Shusterman, O. V. Varlamov, "Using panel antennas with reduced reflectors and slant polarization on VHF broadcasting objects," T-Comm, 2025, vol. 19, no.1, pp. 39-50. (in Russian)

Введение

Несмотря на все возрастающее потребление информационно-развлекательного контента с помощью абонентских устройств, подключенных к сотовым сетям подвижной связи, наземное радиовещание в диапазоне ультракоротких волн (УКВ) сохраняет повсеместное использование и стабильную долю в прослушивании для водителей и пассажиров автомобильного транспорта. Наземное радиовещание, как одно из самых первых применений использования радиотехнологий, в силу большого охвата населения и имеющегося парка бытовых приемников, достаточно консервативно. По этой причине переход к новым технологиям, в частности, к цифровому радиовещанию (DRM/DRM+ [1-5], DAB/DAB+ [6]) в большинстве крупных стран не происходит одновременно, а сопровождается достаточно длительным периодом совместного сосуществования различных систем [7-8]. При этом требуется установка дополнительных передатчиков и антенных систем на существующую вещательную инфраструктуру (мачты и башни), которая изначально не была для этого предназначена.

Аналогичная проблема может возникнуть и при увеличении числа транслируемых каналов. Места для установки дополнительных антенн в ряде случаев оказываются "не удобными" с электромагнитной точки зрения. Первые единичные примеры рассмотрения данной проблемы были изложены авторами в [9].

В настоящей статье на основании проводимого электромагнитного анализа рассматриваются причины возникновения проблемных ситуаций и предлагаются систематизированные решения по их преодолению для призм различного сечения с различными вариантами установки – на поясах и на гранях башни, в том числе с рефлекторами уменьшенного размера.

1 Причины возникновения значительных провалов в диаграмме направленности в горизонтальной плоскости при использовании антенн с линейной поляризацией

В настоящее время подавляющее большинство объектов радиовещания РФ в УКВ диапазоне используют антенны с вертикальной поляризацией. Для обеспечения покрытия заданной территории с заданным качеством передающие антенны должны иметь диаграммы направленности в горизонтальной плоскости (ДНГ) без существенных провалов. К сожалению, условия размещения антенн на существующих металлоконструкциях в ряде случаев не позволяют избежать появления глубоких провалов в ДНГ.

В частности, не удаётся добиться ДНГ, близкой к круговой, на призмах со стороной более 2,5 x 2,5 м, где стандартным решением является использования четырёх панелей в этаже с двумя вертикальными диполями в каждой панели.

Достаточно часто стандартной ситуацией является отсутствие достаточного места на участках верхней части призмы типовых башен 1,75 x 1,75 м и 2,5 x 2,5 м, а ниже этого участка башня имеет переменное расширяющееся сечение большого диаметра, что не позволяет получить слабонаправленную ДНГ.

Другой распространенной ситуацией, где возникают глубокие провалы в заданном для обслуживания секторе углов, является расположение двух вертикальных антенн типа

«Вертикаль» по двум противоположенным сторонам мачты (башни). В этом случае глубокие провалы в ДНГ обусловлены интерференцией двух источников, а также влиянием существующей металлоконструкции.

Условие для возникновения глубоких провалов в ДНГ возникает при суммировании сигналов с сопоставимыми амплитудами и противоположными фазами в заданном направлении:

$$\Delta\theta^\circ = 360^\circ * d/\lambda * \sin(\varphi), \tag{1}$$

где $\Delta\theta^\circ$ – разность фаз в направлении φ ; φ – отклонение от нормали к линии, соединяющей два источника; d – расстояние между двумя источниками сигнала; λ – длина волны.

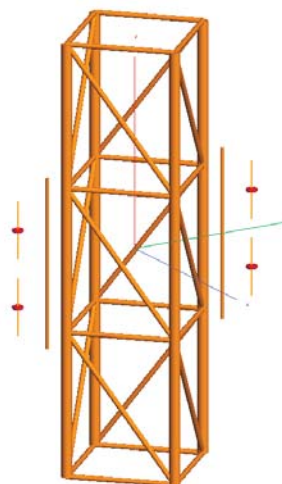
Из (1) видно, что начиная с полуволнового расстояния между двумя источниками сигнала, в некоторых азимутальных направлениях создаются условия для возникновения глубоких интерференционных провалов в ДНГ.

На объектах УКВ вещания существенных провалов удаётся избежать за счёт расположения панелей по четырём сторонам башни и формирования соответствующей ДН для каждой панели. При этом в направлениях, где разность фаз равна 180° , амплитуды сигнала от соседних панелей сильно отличаются, и условие для возникновения глубоких провалов не соблюдается. Это применимо и для вертикальной, и для горизонтальной поляризации.

При росте поперечных размеров башни и увеличении расстояния между антеннами, возникновение существенных провалов в ДНГ становится неизбежным, так как условие $\Delta\theta^\circ = 180^\circ$ возникает в направлениях, где уровни сигналов от соседних панелей уже соизмеримы.

Все приведенные ниже результаты получены с помощью специализированной программы для расчёта антенн FEKO (Altair Engineering, Inc.). Все расчёты произведены с учётом влияния существующих металлоконструкций, которые входили в расчётную модель.

На рисунке 1 изображена антенная система, состоящая из двух антенн типа «Вертикаль», расположенная на двух противоположенных поясах мачты сечением 2,5 x 2,5 м. Расстояние трубостойки антенн до пояса мачты принята равной 0,3 м. Там же приведена её ДНГ в диапазоне частот, рассчитанная с учётом влияния мачты.



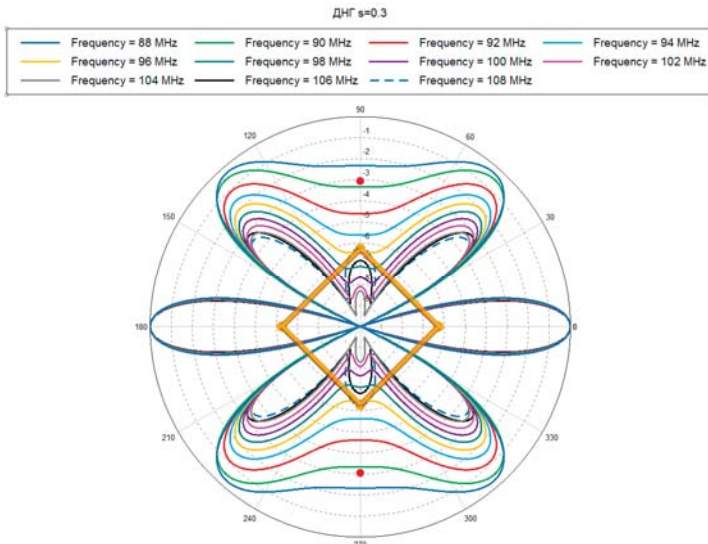


Рис. 1. Антенная система из двух антенн типа «Вертикаль» и её ДНГ

Подобное расположение антенн радиовещательные станции часто используют в расчёте на то, что в главных направлениях 0° и 270° , где расположены половины антенны в ДНГ будет получены два сектора углов без глубоких провалов, а в остальных направлениях глубокие провалы также будут отсутствовать. На рисунке 1 видно, что ДНГ имеет характерные частотнозависимые глубокие провалы, как в главных направлениях, так и в других. Как будет показано ниже, при установке подобной антенной системы на участке башни ещё большего сечения количество глубоких провалов увеличится. Также нужно иметь в виду, что на ДНГ подобных систем в значительной степени влияет существующая металлоконструкция, поскольку существующий рефлектор не обеспечивает достаточную экранировку.

2 Использование антенн с наклонной поляризацией

Наклонная поляризация [10] в последние годы стабильно, но относительно редко, привлекает внимание исследователей для применения в различных приложениях [11-14], включая ММО [15, 16], и в различных диапазонах частот [17-19]. На действующих объектах УКВ радиовещания наклонная поляризация используется редко. Как правило используется вертикальная или горизонтальная поляризация, а также круговая или эллиптическая.

Действительно, в ряде случаев имеется возможность избавиться от появления нежелательных глубоких интерференционных минимумов в ДНГ на башнях с большим поперечным сечением путём использования панелей с одиночными диполями, расположенными наклонно под углом 45° к оси максимального излучения панели. При этом панели расположены по сторонам четырёхугольной призмы, а наклон диполя в каждой панели относительно соседней изменяется на 90° .

На рисунке 2 показан пример такого расположения антенных панелей на башне вокруг металлического ограждения диаметром 12 м.

В этой антенной системе провалы в ДНГ устраняются из-за чередования направления наклона панелей. Действительно, наклонные панели излучают одновременно вертикаль-

ную и горизонтальную поляризацию. Начиная с определенного расстояния (относительно рабочей длины волны) между фазовыми центрами панелей в ДНГ образуются интерференционные минимумы и максимумы.

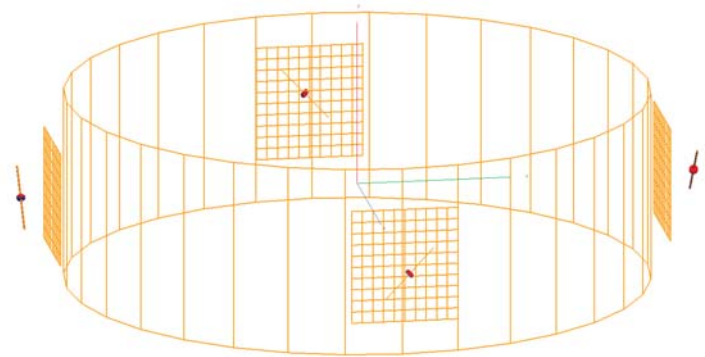


Рис. 2. Пример расположения антенных панелей на башне вокруг металлического ограждения диаметром 12 м

В общем случае, положения этих минимумов и максимумов для вертикальной и горизонтальной поляризации совпадают. Однако, при поочередном изменении наклона соседних панелей на 90° , направление тока вертикальной составляющей остаётся прежней, а направление тока горизонтальной составляющей меняется на противоположенное. В результате этого максимумы поля вертикальной составляющей совпадают с минимумами тока горизонтальной составляющей и наоборот. Рассчитанная на частоте 98 МГц для трёх составляющих электромагнитного поля: горизонтальной (красная), вертикальной (зелёная) и суммарной (синяя), ДНГ антенной системы приведена на рисунке 3.

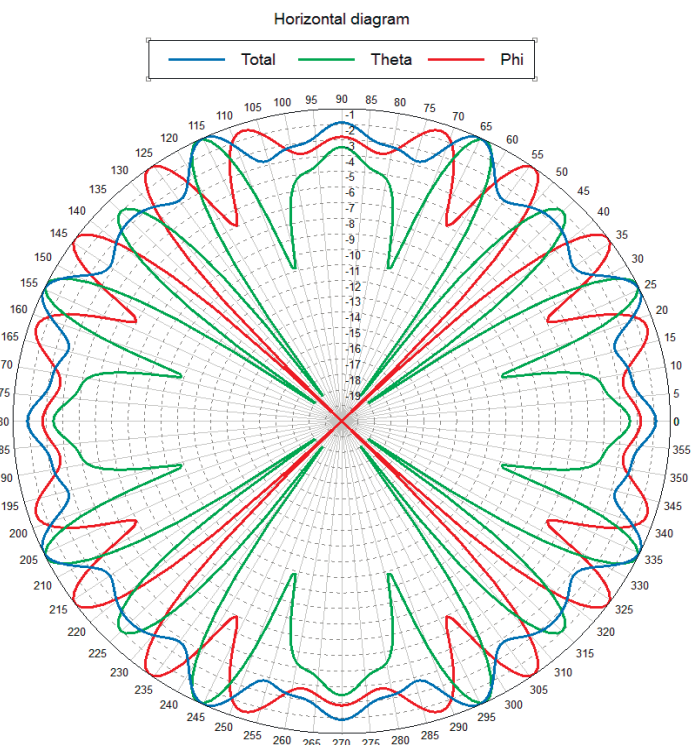


Рис. 3. ДНГ антенной системы на частоте 98 МГц для трёх составляющих электромагнитного поля: горизонтальной (красная), вертикальной (зелёная) и суммарной (синяя)

Рассчитанная результирующая ДНГ для двух крайних и центральной частот радиовещательного диапазона приведена на рисунке 4.

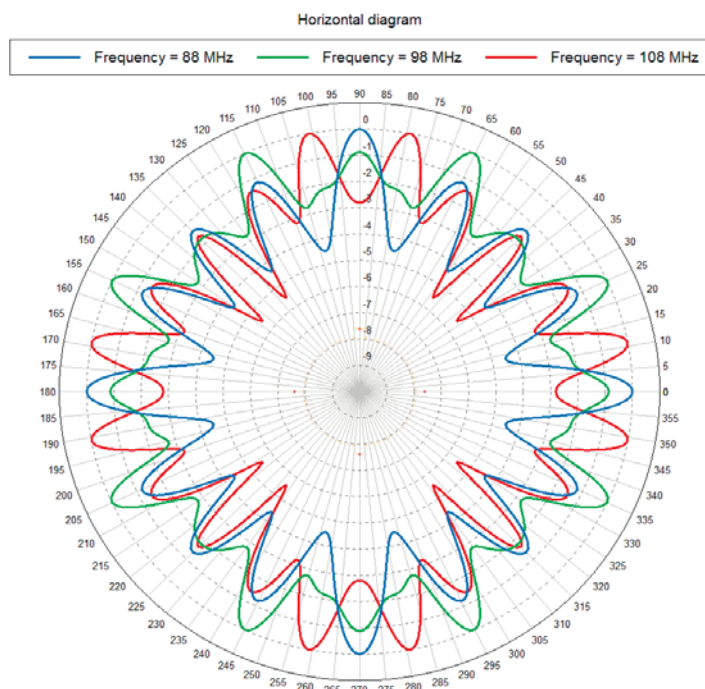


Рис. 4. Результирующая ДНГ для двух крайних и центральной частот радиовещательного диапазона

Рассматривая подобную антенную систему как компромиссный бюджетный вариант, достигнутой неравномерность ДНГ менее 5,5 дБ на крайней частоте можно считать приемлемой для радиовещания. При этом поляризация суммарного сигнала при изменении азимутального направления будет варьироваться между вертикальной, горизонтальной и наклонной - как показано на рисунке 3.

Для рассмотренной антенной системы в расчётной модели использовались рефлекторы стандартных панелей с двумя поляризациями размерами 2,2 x 2,2 м. Однако на использование такого рефлектора могут накладываться ограничения со стороны допустимых механических нагрузок - ветровых и гололедных, особенно при установке на больших высотах, а в отдельных случаях и по стоимости и сложности монтажа. Далее рассмотрены варианты использования рефлектора с уменьшенным размером и его наклонного расположения.

Ниже рассмотрены ряд вариантов, когда использование наклонной поляризации позволяет решить задачи с меньшими затратами по сравнению с традиционными решениями. Рассмотрены два варианта панелей для нескольких типовых сечений призмы: первый с тремя проводами (серийно производится АО «Прима Телеком») и второй несколько большего размера с четырьмя проводами.

На рисунке 5 показаны два варианта панели с одиночным диполем и уменьшенным рефлектором. В варианте 1 рефлектор имеет размеры 0,6 x 2 м и состоит из трёх проводов, а варианте 2 рефлектор имеет размеры 1 x 2 м и состоит из пяти проводов.

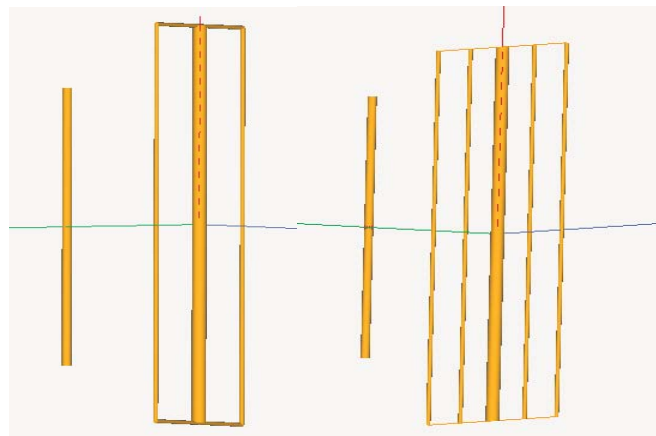


Рис. 5. Два варианта панелей с уменьшенным рефлектором

2.1 Призма 1750x1750 мм

2.1.1 Панель вариант 1. Панели установлены на поясах баины. Расстояние от пояса до рефлектора (по центрам труб) $s=0,8$ м

На рисунке 6 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 7 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

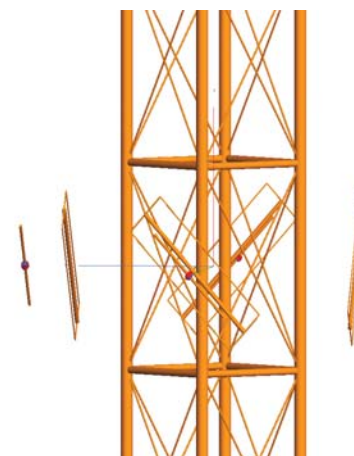


Рис. 6. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 1. Панели установлены на поясе

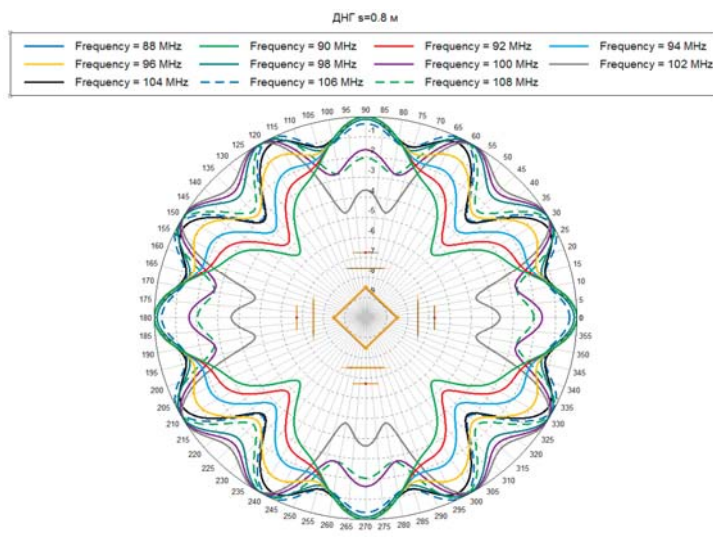


Рис. 7. ДНГ. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 1. Панели установлены на поясе

2.1.2 Панель вариант 2. Панели установлены на поясах башни. Расстояние от пояса до рефлектора (по центрам труб) $s=0,8$ м

На рисунке 8 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 9 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

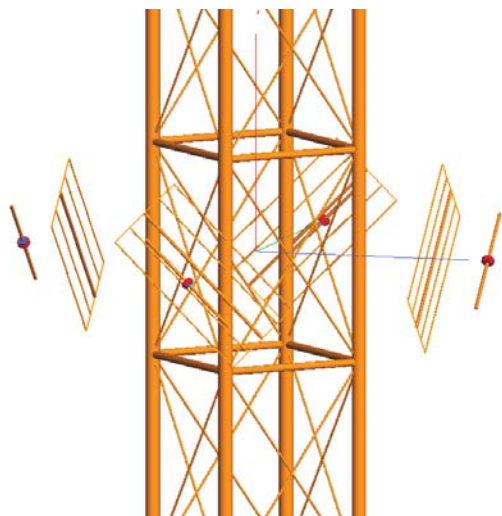


Рис. 8. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 2. Панели установлены на поясе

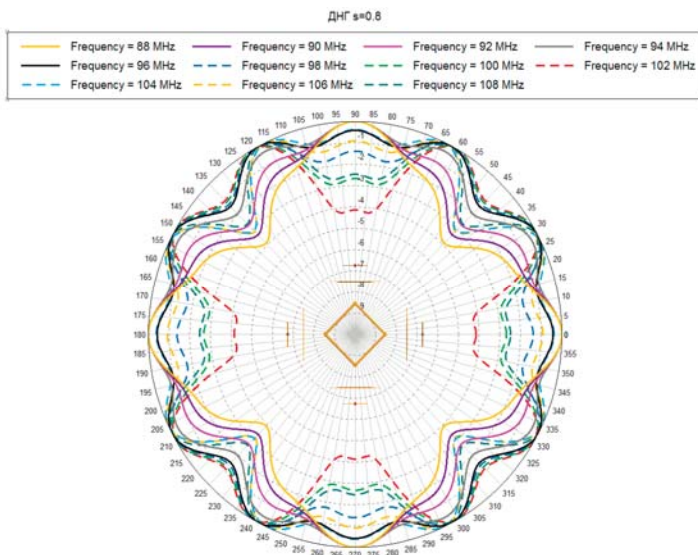


Рис. 9. ДНГ. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 2. Панели установлены на поясе

2.1.3 Панель вариант 2. Панели установлены на гранях башни. Расстояние от плоскости грани до рефлектора (по центрам труб) $s=1,0$ м

На рисунке 10 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 11 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

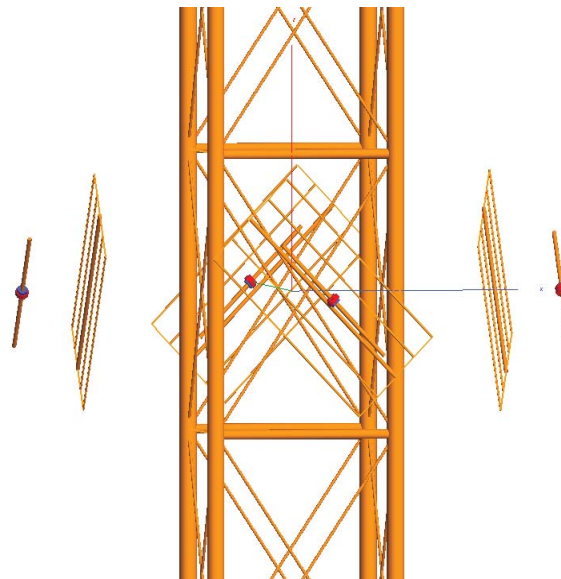


Рис. 10. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 2. Панели установлены на грани

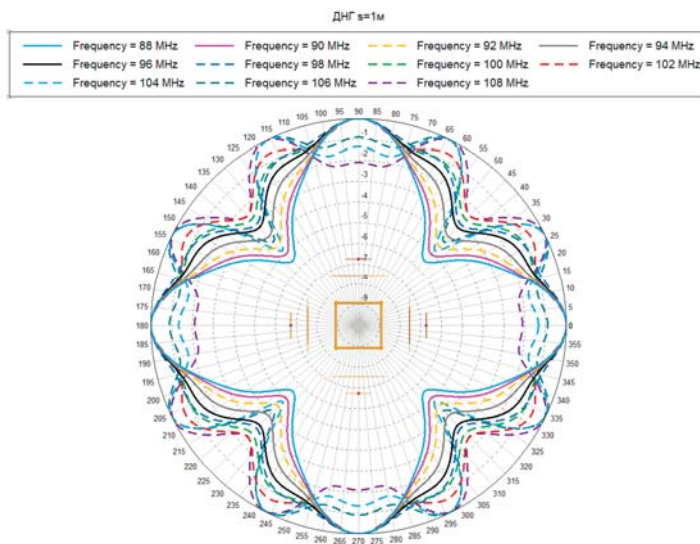


Рис. 11. ДНГ. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 2. Панели установлены на грани

2.1.4 Панель вариант 1. Две панели установлены на двух противоположенных поясах. Расстояние от пояса до рефлектора (по центрам труб) $s=0,7$ м

На рисунке 12 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 13 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

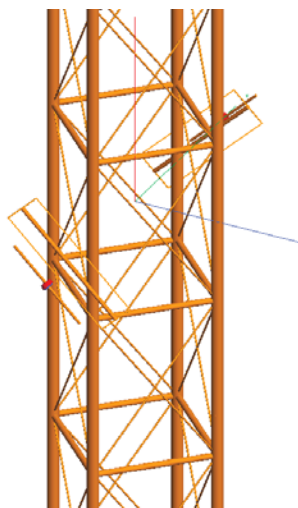


Рис. 12. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные пояса

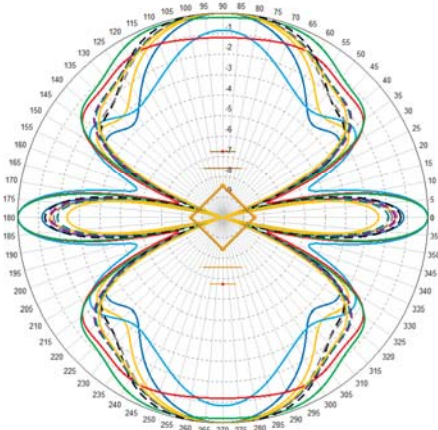
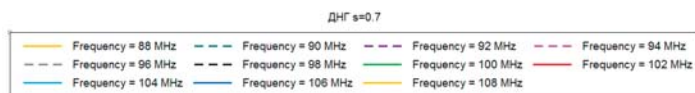


Рис. 13. ДНГ. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные пояса

2.1.5 *Панель вариант 1. Две панели установлены на двух противоположенных гранях. Расстояние от плоскости грани до рефлектора (по центрам труб) $s=0,3$ м*

На рисунке 14 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 15 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.



Рис. 14. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные грани

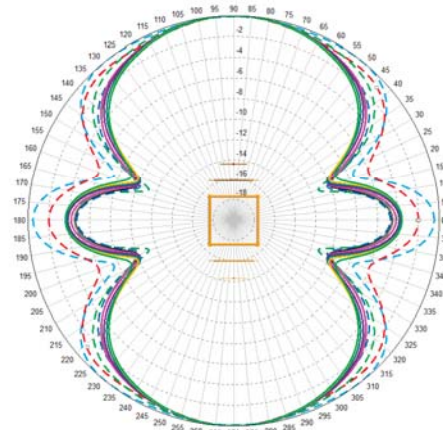
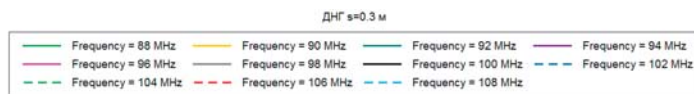


Рис. 15. ДНГ. Призма 1750 x 1750. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные грани

2.2 Призма 2500 x 2500 мм

2.2.1 *Панель вариант 1. Панели установлены на поясах башни. Расстояние от пояса до рефлектора (по центрам труб) $s=0,5$ м*

На рисунке 16 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 17 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

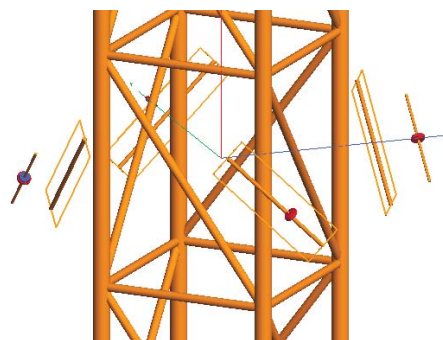


Рис. 16. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на поясе

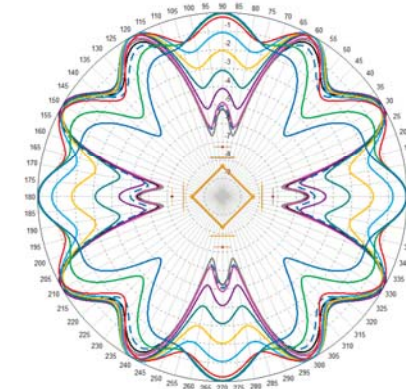
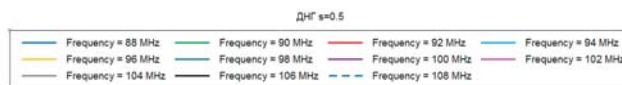


Рис. 17. ДНГ. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на поясе

2.2.2 Панель вариант 1. Панели установлены на гранях башни. Расстояние от плоскости грани до рефлектора (по центрам труб) $s=0,8$ м

На рисунке 18 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 19 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

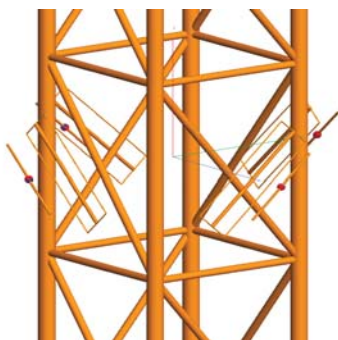


Рис. 18. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на гранях

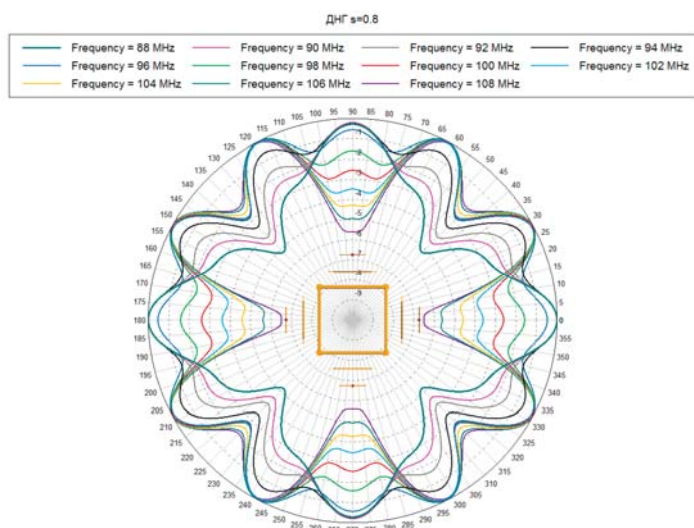


Рис. 19. ДНГ. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на гранях

2.2.3 Панель вариант 2. Панели установлены на поясах башни. Расстояние от пояса до рефлектора (по центрам труб) $s=0,3$ м

На рисунке 20 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 21 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.



Рис. 20. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 2. Панели установлены на поясах

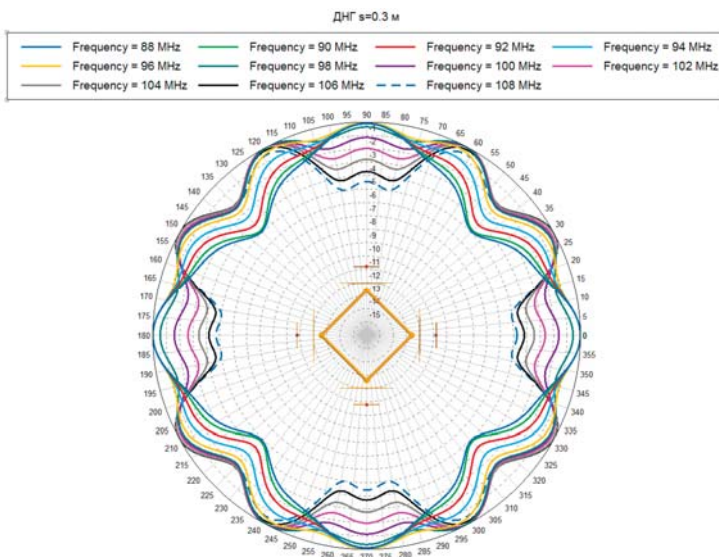


Рис. 21. ДНГ. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 2. Панели установлены на поясах

2.2.4 Панель вариант 2. Панели установлены на гранях башни. Расстояние от плоскости грани до рефлектора (по центрам труб) $s=0,8$ м

На рисунке 22 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 23 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

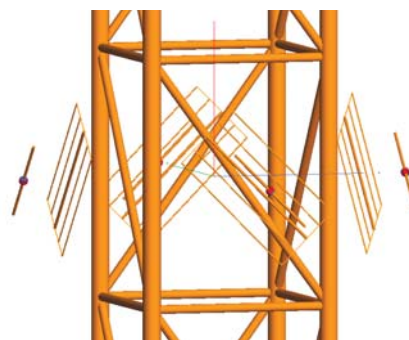


Рис. 22. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 2. Панели установлены на гранях

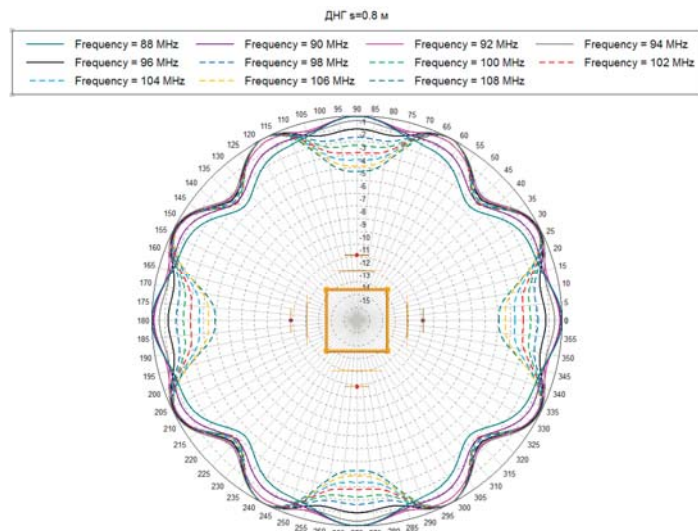


Рис. 23. ДНГ. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 2. Панели установлены на гранях

2.2.5 Панель вариант 1. Две панели установлены на двух противоположенных поясах. Расстояние от пояса до рефлектора (по центрам труб) $s=0,3$ м

На рисунке 24 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 25 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

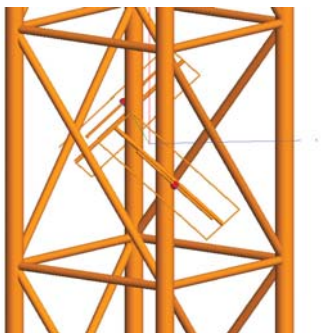


Рис. 24. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные пояса

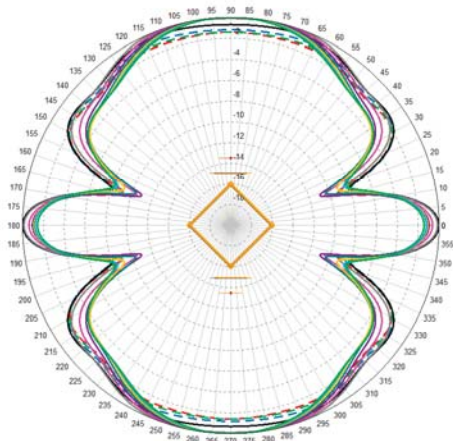
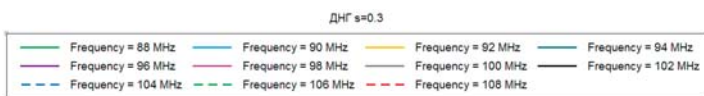


Рис. 25. ДНГ. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные пояса

2.2.6 Панель вариант 1. Две панели установлены на двух противоположенных гранях. Расстояние от плоскости грани до рефлектора (по центрам труб) $s=0,6$ м

На рисунке 26 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 27 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

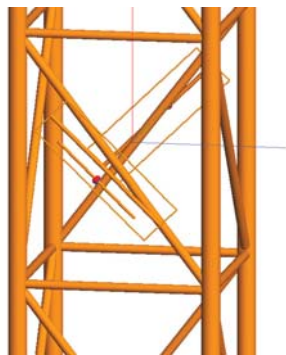


Рис. 26. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные грани

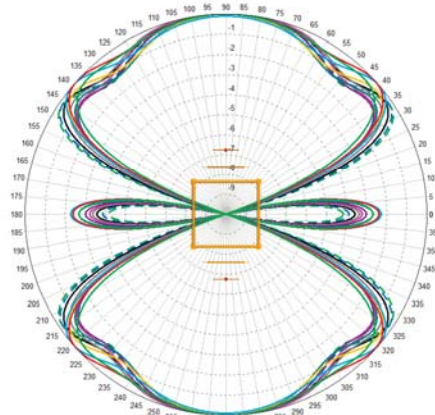


Рис. 27. ДНГ. Призма 2500 x 2500. Панели вариант 1. Панели установлены на противоположенные грани

2.3 Призма большого сечения 9x9 м

2.3.1 Призма 9000x9000. Панель с полноразмерным рефлектором 2200x2200 мм от антенны с двумя поляризациями

На рисунке 28 показано расположение панелей на башне, а на рисунке 29 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

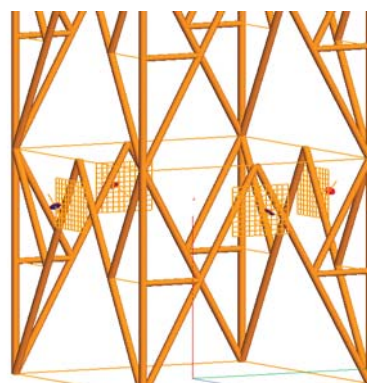


Рис. 28. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 2200 x 2200. Панели установлены на гранях

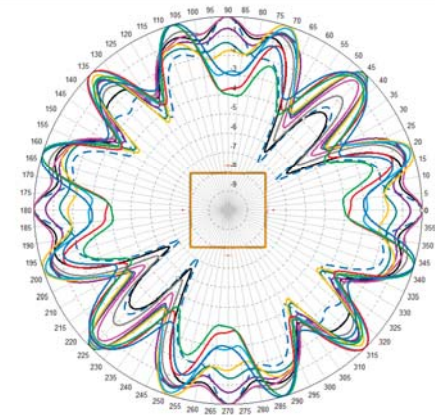
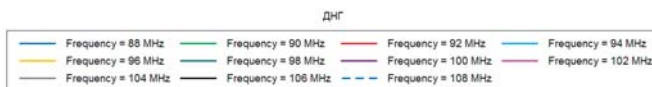


Рис. 29. ДНГ. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 2200 x 2200. Панели установлены на гранях

2.3.2 Призма 9000 x 9000. Панель с полноразмерным рефлектором 2400 x 1750, расположенным наклонно

На рисунке 30 показано расположение панелей на башне, а на рисунке 31 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

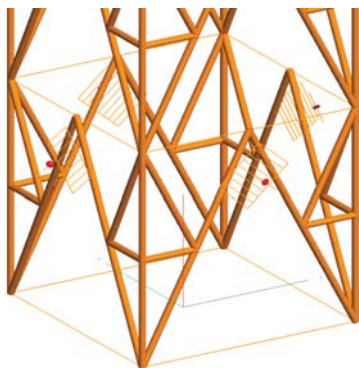


Рис. 30. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 2400 x 1750. Панели установлены на гранях

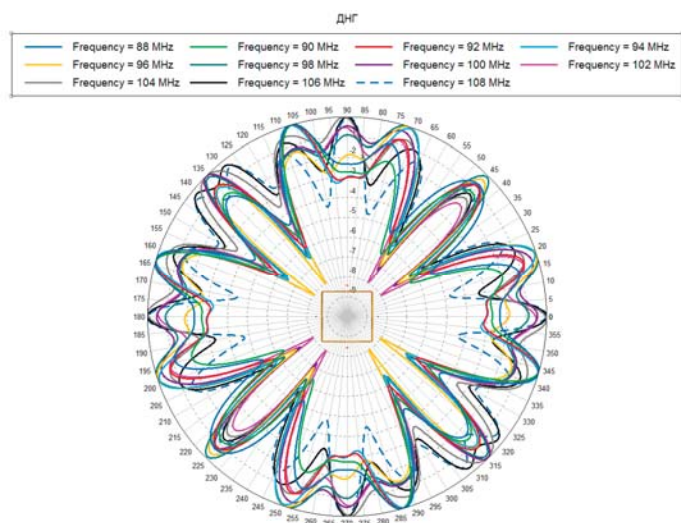


Рис. 31. ДНГ. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 2400 x 1750. Панели установлены на гранях

2.3.3 Панель вариант 2. Панели установлены на гранях призмы 9000x9000. Расстояние от плоскости грани до рефлектора (по центрам труб) $s=0,3$ м

На рисунке 32 показано расположение панелей на башне, а на рисунке 33 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

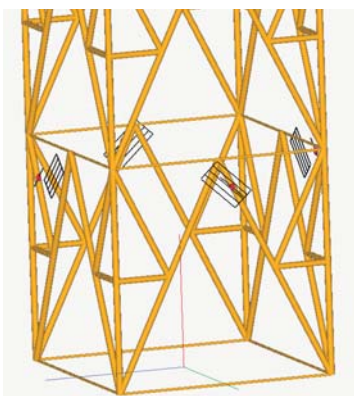


Рис. 33. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 2. Панели установлены на гранях

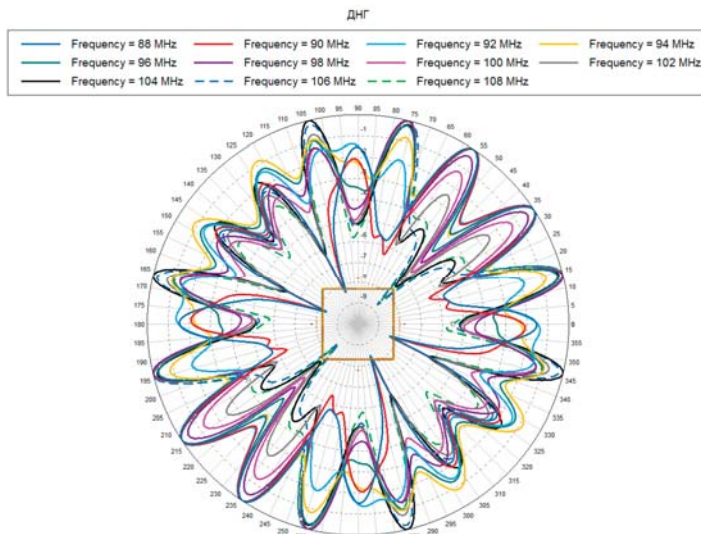


Рис. 33. ДНГ. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 2. Панели установлены на гранях

2.3.4 Панель вариант 1. Две панели установлены на двух противоположенных поясах. Расстояние от пояса до рефлектора (по центрам труб) $s=0,5$ м

На рисунке 34 показано расположение панелей на мачте, а на рисунке 35 приведена ДНГ всей антенной системы в FM диапазоне.

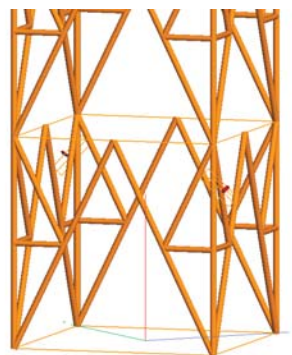


Рис. 34. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 1. Панели установлены на поясах

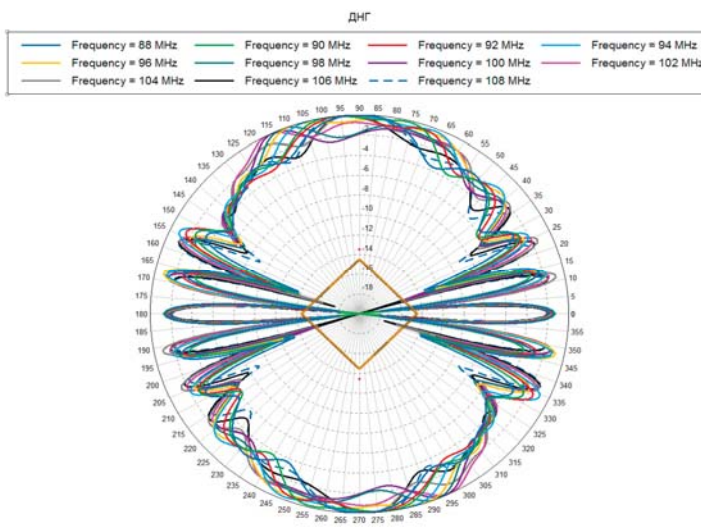


Рис. 35. ДНГ. Призма 9000 x 9000. Панели вариант 1. Панели установлены на поясах

Для сравнения на рисунках 36 и 37 показан аналогичный вариант расположения двух антенн типа «Вертикаль» на той же башне.

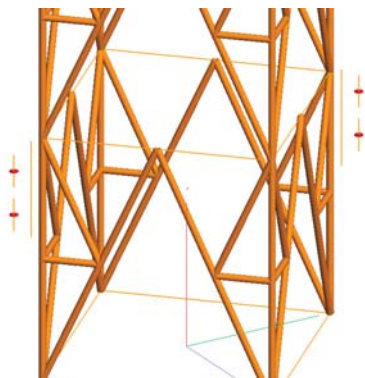


Рис. 36. Призма 9000 x 9000. Две антенны «Вертикаль». Панели установлены на поясах

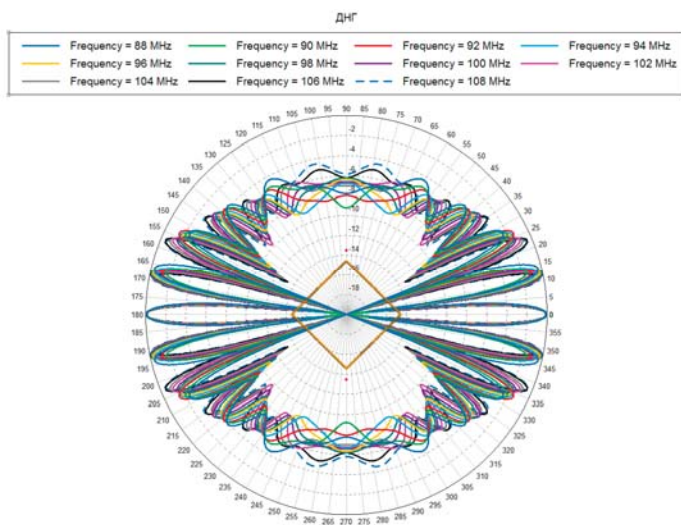


Рис. 37. ДНГ. Призма 9000 x 9000. Две антенны «Вертикаль». Панели установлены на поясах

3 Анализ результатов исследований

3.1 Типовые металлоконструкции с призмами сечением 1750 x 1750 мм и 2500 x 2500 мм

3.1.1 Призма 1750 x 1750

Панель вариант 1 (рис. 6, 7) на поясах призмы даёт приемлемый для радиовещания результат с провалами ДНГ не более 5,5 дБ.

Панель вариант 2 (рис. 10, 11) при расположении на гранях также даёт результат с провалами ДНГ не более 5,5 дБ, что также приемлемо для радиовещания.

Панель вариант 2 (рис. 8, 9) при расположении на поясе даёт лучший результат с провалами ДНГ не более 4 дБ, однако, с точки зрения монтажа этот вариант может быть более трудоёмким.

3.1.2 Призма 2500 x 2500

Панель вариант 1 даёт лучший вариант при расположении на гранях (рис. 18, 19), на большинстве частот провалы не превышают 6 дБ.

Панель вариант 2 даёт лучший вариант при расположении на гранях (рис. 22, 23), на большинстве частот провалы не превышают 4 дБ.

3.1.3 Расположение панелей на противоположенных поясах призмы

Для обоих вариантов призмы расположение панелей вариант 1 (рис. 12-15, 24-27) дают хорошие ДНГ без провалов в главных направлениях по сравнению с традиционным вариантом (рис. 1).

В целом, полученные результаты для рассмотренных типовых металлоконструкций радиовещания можно считать приемлемыми.

3.2 Призма большого сечения

Для примера рассмотрена существующая конструкция башни в виде призмы сечением 9 x 9 м.

Как и ожидалось, наилучшие результаты получены при использовании самого большого рефлектора 2200 x 2200 от типовой антенны с двумя поляризациями (рис. 28, 29), где на большинстве частот провалы не превышают 5 дБ, а на одной частоте имеется провал 6,5 дБ. В данном случае повалы в основном обусловлены переизлучением окружающих элементов металлоконструкции.

Использование стандартного рефлектора 2400 x 1750 (рис. 30, 31), установленного наклонно, даёт несколько худший результат с провалами на отдельных частотах 7-8 дБ, а на большинстве частот повалы менее 6 дБ.

Использование уменьшенного рефлектора вариант 2 (рис. 32, 33) даёт провалы на отдельных частотах 7-9 дБ, а на большинстве частот повалы менее 6,5 дБ.

Сравнение ДНГ для двухстороннего расположения антенн (рис. 34-37) наклонной и вертикальной поляризации очевидно показывает преимущество использования наклонной поляризации.

3.3 Обобщение результатов исследований

Результаты проведенных исследований в обобщенном виде представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Обобщенные результаты исследований

Панель	Расположение	Рисунок, ДНГ	Провалы в ДНГ, дБ, не более
Призма 1,75 x 1,75 м			
Вариант 1, рефлектор 0,6 x 2 м	на 4-х поясах	Рис. 6, 7	5.5
Вариант 2, рефлектор 1 x 2 м	на 4-х поясах	Рис. 8, 9	4 ¹
Вариант 2, рефлектор 1 x 2 м	на 4-х гранях	Рис. 10, 11	5.5
Вариант 1, рефлектор 0,6 x 2 м	на 2-х противоположенных поясах	Рис. 12, 13	4 ^{1,2}
Вариант 2, рефлектор 1 x 2 м	на 2-х противоположенных гранях	Рис. 14, 15	4 ^{1,2}
Призма 2,5 x 2,5 м			
Вариант 1, рефлектор 0,6 x 2 м	на 4-х гранях	Рис. 18, 19	6

Вариант 2 рефлектор 1 х 2 м	на 4-х поясах	Рис. 20, 21	6 ¹
Вариант 2 рефлектор 1 х 2 м	на 4-х гранях	Рис. 22, 23	4
Вариант 1, рефлектор 0,6 х 2 м	на 2-х противоположенных поясах	Рис. 24, 25	4 ^{1,2}
Вариант 1, рефлектор 0,6 х 2 м	на 2-х противоположенных гранях	Рис. 26, 27	4 ²
Референсный вариант антенны с вертикальной поляризацией	на 2-х противоположенных поясах	Рис. 1	10 ²
Призма 9х9 м			
Типовой двухполяризационный рефлектор, 2,2 х 2,2 м	на 4-х гранях	Рис. 28, 29	5 (6,5 ³)
Стандартный, 2,4 х 1,75 м, наклонно	на 4-х гранях	Рис. 30, 31	6 (7...8 ³)
Вариант 2 рефлектор 1 х 2 м	на 4-х гранях	Рис. 32, 33	6,5 (7...9 ³)
Референсный вариант с только вертикальной или горизонтальной поляризацией			>20 дБ

¹ – вариант более трудоёмкий с точки зрения монтажа;
² – в главных направлениях;
³ – на отдельных частотах.

4 Выводы

Показано, что на призме большого сечения при использовании антенн с только вертикальной или горизонтальной поляризацией при разумных затратах глубокие многочисленные провалы в ДНГ более 20 дБ становятся неизбежными.

Учитывая относительную малозатратность предложенных решений, и при наличии некоторого запаса в энергетике в направлении максимальных провалов, подобное использование антенн с наклонной поляризацией является практически безальтернативным.

Полученные результаты также позволяют сделать вывод о целесообразности применения наклонных панелей с уменьшенным рефлектором в качестве альтернативного варианта для получения ДНГ с приемлемой для радиовещания неравномерностью в том случае, когда смешанная поляризация не является существенным препятствием для вещателя.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Varlamov O.V., Bychkova A.A. Basis of Technical Design and Development a Single-Frequency DRM Digital Broadcasting Network for Venezuela // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488396.
4. Varrlamov O.V. DRM digital broadcasting system audio path qualitative characteristics // Synchroninfo Journal, vol. 8, no. 4, pp. 2-8, 2022. DOI: 10.36724/2664-066X-2022-8-4-2-8.

5. Varlamov O.V. DRM Digital Radio Receivers Sensitivity // 2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296930.

6. Santos V.M.J.D. The current state and trends of the development of digital tele-radio broadcasting systems in the world // Synchroninfo Journal, vol. 7, no. 1, pp. 17-23, 2021. DOI: 10.36724/2664-066X-2021-7-1-17-23

7. Dolgopyatova A.V., Varlamov O.V. Analysis of Long-Range VHF Radio Waves Propagation to Specify Protection Ratios Between Coexisting DRM+, RAVIS and IBOC Systems // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488392.

8. Waal A. Coexistence of television broadcasting, FM broadcasting, digital broadcasting in DAB and DRM+ standards calculation methodology // Synchroninfo Journal 2024, vol. 10, no. 1, pp. 18-23. DOI: 10.36724/2664-066X-2024-10-1-18-23.

9. Shusterman F.D., Varlamov O.V. Use of Panel Antennas with Reduced Reflectors and Slant Polarization at VHF Broadcast Sites // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617559.

10. Quan X., Li R., Fan Y., Anagnostou D.E. Analysis and Design of a 45° Slant-Polarized Omnidirectional Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2014, doi: 10.1109/TAP.2013.2288367.

11. Yang Q. et al. Cavity-Backed Slot-Coupled Patch Antenna Array with Dual Slant Polarization for Millimeter-Wave Base Station Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 3, pp. 1404-1413, March 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3017388.

12. Chen F.-C., Liang Y.-Z., Zeng W.-F., Xiang K.-R. A Series-Fed Slant-Polarized Microstrip Patch Antenna Array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 72, no. 6, pp. 5367-5372, June 2024, doi: 10.1109/TAP.2024.3394215.

13. Sadiq M.S., Ruan C. Dual Slant Polarized Omnidirectional Antenna // 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), Shanghai, China, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/IWS49314.2020.9360160.

14. Pastukh A., Tikhvinskiy V., Dymkova S., Varlamov O. Challenges of Using the L-Band and S-Band for Direct-to-Cellular Satellite 5G-6G NTN Systems // Technologies, vol. 11, no. 4, p. 110, Aug. 2023, doi: 10.3390/technologies11040110.

15. Keshavarz R., Winson D., Lipman J., Abolhasan M., Shariati N. Dual-Band, Slant-Polarized MIMO Antenna Set for Vehicular Communication // 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133527.

16. Shen L.-P., Jamali H., Wu X. Compact Slant 45° Dual-Polarized Butler-based Omni-Directional MIMO Antennas // 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), Singapore, Singapore, 2021, pp. 979-980, doi: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704781.

17. Gu C., Zhang Z., Cheng F. D-band ±45° Slant Polarized All-Metal Antenna // 2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Guangzhou, China, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10106907.

18. Sun Z., Jiang X., Liu Y., Cheng L., He T. Millimeter-Wave ±45° Dual Slant Polarization Wide-Beam Antenna // 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Harbin, China, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICMMT55580.2022.10023215.

19. Mangubat F.N. Design of an Optimized Space Diversified Antenna Arrays for Extended FM-RF Propagation // 2020 Asia Conference on Computers and Communications (ACCC), Singapore, Singapore, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ACCC51160.2020.9347928.

USING PANEL ANTENNAS WITH REDUCED REFLECTORS AND SLANT POLARIZATION ON VHF BROADCASTING OBJECTS

Felix D. Shusterman, Russian Television and Radio Broadcasting Network, Moscow, Russia, FShusterman@trn.ru

Oleg V. Varlamov, Moscow Technical University of communications and Informatics, Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

Abstract

When it is necessary to increase the number of broadcast channels or when switching to digital radio broadcasting is in prospect, it is necessary to place additional antenna systems on the existing broadcasting infrastructure (masts and towers), which was not originally intended for this. In some cases, the places for installing additional antennas turn out to be "inconvenient" from the electromagnetic point of view. Thus, on a prism of a large cross-section, when using antennas with only vertical or only horizontal polarization at reasonable costs, deep multiple dips in the radiation pattern of more than 20 dB become inevitable. In this article, based on the electromagnetic analysis, the causes of problematic situations are considered and systematized solutions are proposed to overcome them for prisms of different cross-sections with different installation options - on belts and on tower faces, including with reflectors of reduced size. The proposed use of alternating antennas with slant polarization allows to reduce the unevenness of the radiation pattern to 4...5 dB when using standard reflectors and to 6...7 dB when using more technologically advanced and economical reflectors of reduced size.

Keywords: digital radio broadcasting, FM radio broadcasting, panel antenna, radiation pattern, reduced reflector, slant polarization.

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] O. V. Varlamov, "DRM digital broadcasting system audio path qualitative characteristics," *Synchroinfo Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 2-8, 2022. DOI: 10.36724/2664-066X-2022-8-4-2-8
- [5] O. V. Varlamov, "DRM Digital Radio Receivers Sensitivity," *2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296930
- [6] V. M. J. D. Santos, "The current state and trends of the development of digital tele-radio broadcasting systems in the world," *Synchroinfo Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 17-23, 2021. DOI: 10.36724/2664-066X-2021-7-1-17-23
- [7] A. V. Dolgopyatova, O. V. Varlamov, "Analysis of Long-Range VHF Radio Waves Propagation to Specify Protection Ratios Between Coexisting DRM+, RAVIS and IBOC Systems," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488392
- [8] A. Waal, "Coexistence of television broadcasting, FM broadcasting, digital broadcasting in DAB and DRM+ standards calculation methodology," *Synchroinfo Journal*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 18-23. DOI: 10.36724/2664-066X-2024-10-1-18-23
- [9] F. D. Shusterman, O. V. Varlamov, "Use of Panel Antennas with Reduced Reflectors and Slant Polarization at VHF Broadcast Sites," *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617559
- [10] X. Quan, R. Li, Y. Fan, D. E. Anagnostou, "Analysis and Design of a 45 Slant-Polarized Omnidirectional Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2014, doi: 10.1109/TAP.2013.2288367
- [11] Q. Yang, et al., "Cavity-Backed Slot-Coupled Patch Antenna Array With Dual Slant Polarization for Millimeter-Wave Base Station Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 3, pp. 1404-1413, March 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3017388
- [12] F. -C. Chen, Y. -Z. Liang, W. -F. Zeng, K. -R. Xiang, "A Series-Fed Slant-Polarized Microstrip Patch Antenna Array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 6, pp. 5367-5372, June 2024, doi: 10.1109/TAP.2024.3394215
- [13] M. S. Sadiq, C. Ruan, "Dual Slant Polarized Omnidirectional Antenna," *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Shanghai, China, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/IWS49314.2020.9360160
- [14] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, S. Dymkova, O. Varlamov, "Challenges of Using the L-Band and S-Band for Direct-to-Cellular Satellite 5G-6G NTN Systems," *Technologies*, vol. 11, no. 4, p. 110, Aug. 2023, doi: 10.3390/technologies11040110
- [15] R. Keshavarz, D. Winson, J. Lipman, M. Abolhasan, N. Shariati, "Dual-Band, Slant-Polarized MIMO Antenna Set for Vehicular Communication," *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Florence, Italy, 2023, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133527
- [16] L. -P. Shen, H. Jamali, X. Wu, "Compact Slant 45° Dual-Polarized Butler-based Omni-Directional MIMO Antennas," *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, Singapore, Singapore, 2021, pp. 979-980, doi: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704781
- [17] C. Gu, Z. Zhang, F. Cheng, "D-band ±45° Slant Polarized All-Metal Antenna," *2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Guangzhou, China, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10106907
- [18] Z. Sun, X. Jiang, Y. Liu, L. Cheng, T. He, "Millimeter-Wave ±45° Dual Slant Polarization Wide-Beam Antenna," *2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Harbin, China, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICMMT55580.2022.10023215.
- [19] F. N. Mangubat, "Design of an Optimized Space Diversified Antenna Arrays for Extended FM-RF Propagation," *2020 Asia Conference on Computers and Communications (ACCC)*, Singapore, Singapore, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ACCC51160.2020.9347928.

Information about authors:

Felix D. Shusterman, Head of Department, "Department of Radio Broadcasting and Radio Communications", Russian Television and Radio Broadcasting Network, Moscow, Russia
Oleg V. Varlamov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Radio Equipment and Circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ УРОВНЯ УДОБСТВА ДВИЖЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ГОРОДСКИХ ДОРОГАХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Клюев Роман Владимирович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия;
Московский политехнический университет, Москва, Россия

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-51-58

Косцов Алексей Валерьевич,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия;
МАДИ, Москва, Россия,
kostsov_msfs@bk.ru

Manuscript received 20 November 2024;
Accepted 12 December 2024

Мартяхин Дмитрий Сергеевич,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия;
МАДИ, Москва, Россия

Кортиев Алан Леванович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Берко Алексей Александрович,
СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ, Россия

Ключевые слова: городские дороги,
улично-дорожная сеть, интеллектуальные
транспортные системы, уровень удобства
движения, проектирование дорог

Растущий спрос населения на внутригородские передвижения в условиях высокого уровня автомобилизации привел к формированию сети городских дорог скоростного движения, предназначенной для удовлетворения потребностей населения в быстрых и комфортных передвижениях по территории крупных и крупнейших городов. Рост интенсивности движения на сети городских дорог скоростного движения в значительной степени опережает темпы дорожно-мостового строительства. В этих условиях от экстенсивного роста протяженности транспортной сети инженеры перешли к применению методов улучшения условий движения и повышения эффективности эксплуатации существующей транспортной инфраструктуры. Один из основных методов повышения эффективности работы городских дорог скоростного движения является внедрение интеллектуальных транспортных систем, направленных на ограничение

доступа автомобилей на проезжую часть, что позволяет обеспечить высокий уровень удобства движения на сети городских дорог скоростного движения. Разработка мероприятий по управлению движением на въездах в сеть городских дорог скоростного движения требует совершенствования методов оценки пропускной способности и уровня удобства движения на основной проезжей части, что является основой для формирования требований к управлению работой интеллектуальных транспортных систем. В статье приведены результаты исследований, позволяющих выполнять оценку пропускной способности и уровня удобства движения на участках переплетения транспортных потоков для повышения уровня удобства движения на сети городских дорог скоростного движения, в том числе при помощи интеллектуальных транспортных систем.

Информация об авторах:

Клюев Роман Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия; Московский политехнический университет, Москва, Россия

Косцов Алексей Валерьевич, к.т.н., доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия;
доцент, "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)", Москва, Россия

Мартяхин Дмитрий Сергеевич, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ; Россия;
доцент кафедры "Изыскания и проектирование дорог" ФГБОУ ВО "МАДИ", Москва, Россия

Кортиев Алан Леванович, к.т.н., доцент кафедры начертательной геометрии и геодезии ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия

Берко Алексей Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)", г. Владикавказ, Россия

Для цитирования:

Клюев Р.В., Косцов А.В., Мартяхин Д. С., Кортиев А.Л., Берко А.А. К вопросу о расчете уровня удобства движения при создании интеллектуальных транспортных систем на городских дорогах скоростного движения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 51-58.

For citation:

R.V. Klyuev, A.V. Kostsov, D.S. Martyakhin, A.L. Kortiev, A.A. Berko, "Calculating the ease movement level with creating intelligent transport systems on high-speed urban roads," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 1, pp. 51-58. (in Russian)

Введение

Процессы урбанизации, становление и развитие городских агломераций, повышение доли передвижений на автомобильном транспорте приводят к необходимости переосмысления транспортной политики и совершенствования исторически сложившейся транспортной инфраструктуры городов. Одним из важнейших направлений повышения качества транспортного обслуживания населения является формирование нового транспортного каркаса, предназначенного в основном для обеспечения быстрых и удобных передвижений при помощи легкового автомобиля – городских дорог скоростного движения.

Городские дороги скоростного движения, имея крайне низкую протяженность, составляющую до 5% от общей протяженности улично-дорожных сетей, обеспечивают до 30% всех передвижений автомобильным транспортом в пределах крупных и крупнейших городов [1]. Значительная концентрация транспортных потоков на сети городских дорог скоростного движения обусловлена рядом факторов: обеспечением высоких скоростей сообщения и показателей безопасности движения, комфорта и удобства передвижений. Объединение сети городских дорог скоростного движения с транспортным каркасом страны – сетей автомагистралей и скоростных автомобильных дорог позволяет обеспечивать «бесшовные» региональные и межрегиональные транспортные связи.

Крайне высокие затраты на строительство сети городских дорог скоростного движения определяют необходимость повышения эффективности использования уже сложившейся сети дорог городов. В этой связи для достижения целей разумного использования существующей городской транспортной инфраструктуры самое широкое применение должны находить инновационные технологии на транспорте – интеллектуальные транспортные системы и системы «умного города». Применение таких систем позволяет не только повысить эффективность использования сложившейся улично-дорожной сети без устройства новых дорогостоящих элементов дорожной сети, но и обеспечить повышение показателей безопасности движения – важнейшего показателя качества работы транспортной инфраструктуры.

Алгоритмы работы интеллектуальных транспортных систем и систем «умного города» основаны на принципах управления режимом движения автомобилей с учетом данных о закономерностях движения транспортных потоков. Поэтому для построения эффективных интеллектуальных транспортных систем города необходимы актуальные данные о режимах движения транспортных потоков в современных условиях, характерных для крупных и крупнейших городов Российской Федерации.

Для оценки технико-экономических показателей работы улично-дорожных сетей принято использовать показатель «уровня удобства движения» – комплексного показателя, характеризующего режим движения транспортного потока – его скорости, удобства движения, надежности работы водителя и др. На территории Российской Федерации, при организации движения транспортных потоков на магистральных городских дорогах скоростного движения используют комплексный показатель «уровня удобства движения» (УУД). Показатель «уровень удобства движения» находится в тесной взаимосвязи со скоростью движения на дороге и уровнем

загрузки дороги «z» (см. табл. 1), что позволяет использовать показатель «уровень удобства движения» для установления требований к обеспечению качества транспортного обслуживания при помощи сетей городских дорог скоростного движения.

Таблица 1

Уровни удобства движения (УУД)

Уровень удобства движения (УУД)	Показатель			Характеристика УУД
	уровень загрузки, Z	Коэффициент скорости движения K _c	Коэффициент насыщения движением ρ	
А	< 0,2	> 0,9	< 0,1	Движение одиночного автомобиля. Автомобили при движении не испытывают помех со стороны транспортного потока
Б	0,2 – 0,45	0,7 – 0,9	0,1 – 0,3	Необходимость совершения обгонов для поддержания желаемой скорости движения
В	0,45 – 0,7	0,55 – 0,7	0,3 – 0,7	Колонное движение автомобилей в режиме транспортного потока
Г	0,7 – 1,0	0 – 0,55	0,7 – 1	Затор. Возможны остановки движения транспортного потока

Показатель УУД определяется отношением интенсивности движения (q) к пропускной способности (Q) участка автомобильной дороги (1):

$$z_{\min} \leq \frac{q}{Q} \leq z_{\max} \tag{1}$$

где z_{мин} – минимальное значение показателя загрузки дороги для данного УУД; z_{макс} – максимальное значение показателя загрузки дороги для данного УУД.

Уровень удобства движения на городских дорогах скоростного движения во многих случаях определяется пропускной способностью и интенсивностью движения на участках переплетения транспортных потоков, поскольку на таких участках производится значительное количество смен полос движения автомобилей на ограниченной длине, что приводит к существенному снижению пропускной способности, и как следствие, снижению скорости и удобства движения [2] на значительном протяжении дороги.

Указанное обстоятельство подтверждается рядом исследований. Так, в частности, в исследовании Coifman B., Kim S. (2011) [3] представлены доказательства того, что широко используемый подход, согласно которому взаимодействие транспортных потоков осуществляется только в точках его слияния и разделения не дает адекватного описания условий движения на участках слияний, разделений и переплетений транспортных потоков на автомагистралях и городских дорогах скоростного движения. В действительности процессы слияния и переплетения транспортных потоков оказывают значительное влияние на режим движения автомобилей на больших расстояниях. В исследовании Coifman B., Kim S.

(2011) показано, что снижение пропускной способности и скоростей движения наблюдается более чем в 1,5 км от участков слияний и переплетений транспортных потоков. В исследовании Chen D., Ahn S. (2018) [4] показано, что расположенные на небольших расстояниях друг от друга участки переплетения транспортных потоков на автомагистралях и городских дорогах скоростного движения являются основными источниками заторов на дорогах. В этих и многих других исследованиях отмечается, что в основе снижения пропускной способности на участках переплетения транспортных потоков лежат процессы смены полос движения автомобилями, движущимися на съезд с основной проезжей части и автомобилями, движущимися со съезда на основную проезжую часть дороги.

К настоящему времени проведено значительное количество исследований, посвященных изучению процессов смены полос движения автомобилем, движущимся в пределах участков переплетения на городских дорогах скоростного движения. В исследовании Zheng Z. (2014) [5] представлены основные разработанные до настоящего времени модели движения автомобилей при выполнении смены полос движения. Основные модели смены полосы движения, в соответствии с данными Zheng Z. (2014), можно разделить на две основные группы: модели, направленные на изучение процесса принятия решений о смене полосы движения, и модели, направленные на качественную и количественную оценку влияния поведения водителя при смене полосы движения на режим движения транспортного потока.

В соответствии с данными исследования Srivastava A., Jin W. (2016) [6] даже один или несколько маневров смены полосы движения на городской дороге скоростного движения в условиях движения плотных транспортных потоков (в условиях УУД – «В», см. табл. 1) может привести к переходу состояния транспортного потока в УУД – «Г», что соответствует значительному снижению скоростей движения и существенному снижению эффективности работы улично-дорожных сетей в целом. Выполнение маневра смены полосы движения вблизи участка переплетения транспортных потоков снижает пропускную способность на всех полосах многополосных дорог и приводит к снижению пропускной способности всего сегмента автомагистрали.

В многочисленных исследованиях изучалось также влияние регулирования ограничения скорости и смены полосы движения на решение проблемы заторов в пределах участков переплетения транспортных потоков. В исследовании Srivastava, A., Jin, W. (2016) [6] предложено инновационное решение по улучшению условий движения на участках переплетения транспортных потоков путем регулирования скоростей движения на участке городской дороги скоростного движения. Для этого предложено использовать интегрированный контроллер, позволяющий отслеживать скоростной режим и количество маневров смены полос движения. Принцип действия контроллера основан на разработанной авторами исследования модифицированной модели передачи данных по многосекционным ячейкам (СТМ). Показания знаков переменной информации, отображающих скоростной режим на дороге, оптимизируются с использованием данных моделирования. По данным [6], предложенные методы управления режимом движения транспортных потоков апробированы и дают хорошие результаты. Также, особое внимание в

исследованиях уделено изучению выполнения смены полосы движения в условиях движения высокоавтоматизированных транспортных средств [7-9, 16-19] и оценке риска возникновения дорожно-транспортных происшествий при смене полос движения [10-15].

Особого внимания заслуживают исследования Yan Z., Yang K. (2020) [7], в которых разработаны методы распознавания намерений водителя сменить полосу движения при движении высокоавтоматизированных транспортных средств. В исследовании Xia Y., Qu Z., Sun Z., Li Z. (2021) [8] предложена модель для выявления намерений водителя по смене полосы движения (HLCIUM) для применения для условий автономного вождения. Предлагаемая модель имитирует работу человека при выполнении смены полосы движения: система помощи в выполнении маневров (ПВМ) концентрируется на окружающих транспортных средствах и соответствующим образом распознает их намерения по смене полосы движения. Система помощи ПВМ измеряет скорости окружающих транспортных средств и распознает автомобили, которые потенциально могут выполнить маневр по смене полосы движения. Внимание системы помощи ПВМ привлекается к соответствующему транспортному средству. Затем намерение по смене полосы движения идентифицируется распознавателем намерений на основе скрытой марковской модели (НММ).

В исследовании (Wu Kulcsár, Ahn Qu, 2020) [16] предложен метод информирования водителей о движении неисправного автомобиля для целей предварительной смены полосы движения. В исследовании (Xu Zhang, Cassandras Li Feng, 2020) [17] предложены алгоритмы совместного управления высокоавтоматизированных транспортных средств в зонах въездов и съездов при помощи сетей беспроводной связи. В исследовании (Nie Li, Wang Zhao, Lian Outbib, 2020) [18] предложен метод управления автомобилем при смене полос движения, основанный на определении и учете скорости движения и ускорения автомобилей, окружающих транспортное средство, выполняющее маневр перестроения.

Выполненный анализ проведенных к настоящему моменту исследований, направленных на изучение закономерностей выполнения маневров автомобилей показывает, что исследования режимов движения автомобилей при смене полос движения на участках переплетения рассматриваются в основном на микроскопическом уровне и посвящены изучению режимов движения одиночного автомобиля [19, 20], а также разработке алгоритмов помощи водителю при смене полос движения. Исследований, посвященных изучению режимов движения автомобилей на участках переплетения на мезоскопическом и макроскопическом уровне недостаточно. Анализ таких показал, что посвящены они в основном адаптации «кинематических» теорий к условиям движения на участках переплетения [21], а также рассмотрению режимов движения транспортного потока как волн, распространяющихся вдоль автомобильной дороги [6, 19].

В последнее время, с развитием новых методов сбора данных о режимах движения транспортных потоков появляются исследования, в которых для изучения движения транспортных потоков используются данные о траекториях движения автомобилей при смене полос движения [22-26], а также основанные на решениях детерминировано-стохастической модели движения транспортных потоков [27, 28].

Методы оценки пропускной способности городских дорог скоростного движения, в основе которых лежат решения детерминировано-стохастических моделей движения транспортных потоков могут быть использованы в качестве компонентов интеллектуальных транспортных систем, поскольку позволяют рассчитывать пропускную способность участков переплетения транспортных потоков на городских дорогах скоростного движения с учетом влияния не только дорожных условий, но и интенсивностей движения транспортных потоков. Определение пропускной способности участка переплетения при применении детерминировано-стохастических моделей производится с учетом как для движущихся по основной проезжей части автомобилей, так и движущихся по съездам пересечений и примыканий к основной проезжей части дороги, что позволяет повысить точность выполняемых расчетов.

Вместе с тем, для принятия решений в области проектирования автомобильных дорог, решения задач организации движения и формирования алгоритмов работы интеллектуальных транспортных систем необходимо иметь частные решения детерминировано-стохастических моделей с учетом особенностей движения транспортных потоков в крупных и крупнейших городах нашей страны. Выполненный к настоящему моменту комплекс экспериментальных исследований режимов движения транспортных потоков в современных условиях позволяет выполнять поиск частных решений детерминировано-стохастической модели движения транспортных потоков.

Цель данного исследования – нахождение частных решений детерминировано-стохастической модели движения транспортных потоков путем выполнения математического моделирования режимов движения транспортных потоков на участках переплетений городских дорог скоростного движения.

Результаты математического моделирования режимов движения транспортных потоков на участках переплетений городских дорог скоростного движения могут быть рекомендованы в качестве методической основы для разработки интеллектуальных транспортных систем, позволяющих регулировать интенсивность входящего на городскую дорогу скоростного движения транспортного потока для обеспечения заданного уровня удобства движения.

Математическое моделирование режимов движения транспортных потоков на участках переплетений городских дорог скоростного движения

В настоящем исследовании проведено математическое моделирование режимов работы участков переплетения транспортных потоков с учетом условий движения в крупных и крупнейших городах нашей страны. Исследования выполнены для наиболее распространенных случаев сопряжения проезжей части основного направления движения и съездов: однополосных переходно-скоростных полос (см. рис. 1а) и двухполосных переходно-скоростных полос (см. рис. 1б). Математическое моделирование производилось при условии равенства интенсивностей движения, выезжающего и въезжающего с городской дороги транспортных потоков ($q_{22} = q_{21}$). При проведении математического моделирования была использована разработанная ранее авторами детерминировано-стохастическая модель движения транспортных потоков,

которая может быть применена для расчета пропускной способности участков переплетения транспортных потоков [27, 28]. Ряд переменных детерминировано-стохастической модели принят с учетом результатов ранее проведенных исследований: распределение автомобилей по проезжей части принято в соответствии с данными, изложенными в [29], вероятность смены полос движения – в соответствии с результатами исследований [30, 31]. Результаты численного моделирования режимов движения транспортных потоков на участках переплетения для шестиполосных дорог приведены на рисунке 2а, для восьмиполосных – на рисунке 2б, десятиполосных – на рисунке 2в. Уравнения $Q_p = f(L_n, q_{22}, q_{21})$ для уровня удобства движения – «В», $q_{22} = q_{21}$ даны в таблице 2.

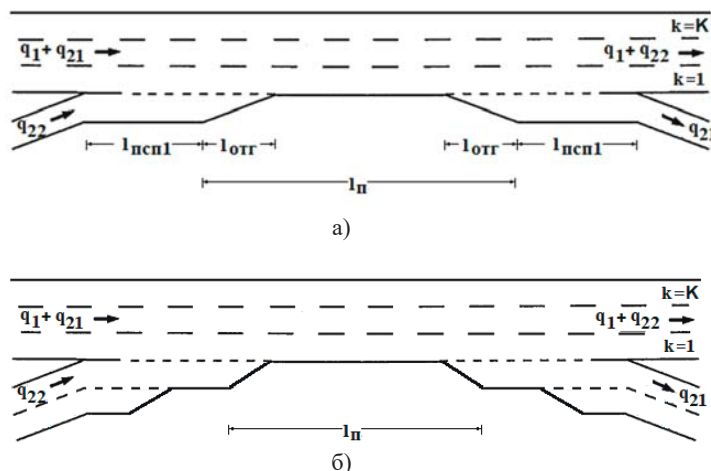


Рис. 1. Схема планировочного решения участка переплетения транспортных потоков: а) при сопряжении однополосных съездов с переходно-скоростной полосой (В1-С1); б) при сопряжении двухполосных съездов с переходно-скоростными полосами (В3-С3)

Таблица 2

Пропускная способность участков переплетения Q_p

№ п/п	Тип сопряжений	Уравнение	R^2
K=3			
1	В1-С1	$0,5Q_p = 5E-14L_n^5 - 4E-10L_n^4 + 1E-06L_n^3 - 0,0022L_n^2 + 1,7591L_n + 826,35$	1,0
2	В3-С3	$0,5Q_p = -1E-13L_n^5 + 6E-10L_n^4 - 7E-07L_n^3 - 0,0006L_n^2 + 1,7026L_n + 836,96$	
K=4			
3	В1-С1	$0,5Q_p = 2E-13L_n^5 - 1E-09L_n^4 + 3E-06L_n^3 - 0,0038L_n^2 + 2,5998L_n + 711,06$	1,0
4	В3-С3	$0,5Q_p = -1E-13L_n^5 + 7E-10L_n^4 - 8E-07L_n^3 - 0,0007L_n^2 + 2,0747L_n + 817,52$	
K=5			
5	С1-В1	$0,5Q_p = 7E-14L_n^5 - 6E-10L_n^4 + 2E-06L_n^3 - 0,003L_n^2 + 2,3849L_n + 749,48$	1,0
6	С3-В3	$0,5Q_p = -1E-13L_n^5 + 7E-10L_n^4 - 1E-06L_n^3 + 1E-05L_n^2 + 1,7206L_n + 893,68$	

Обсуждение и выводы

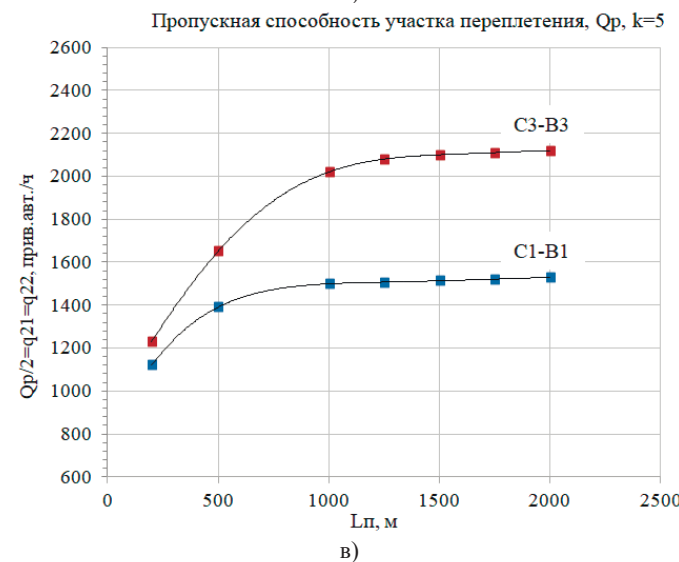
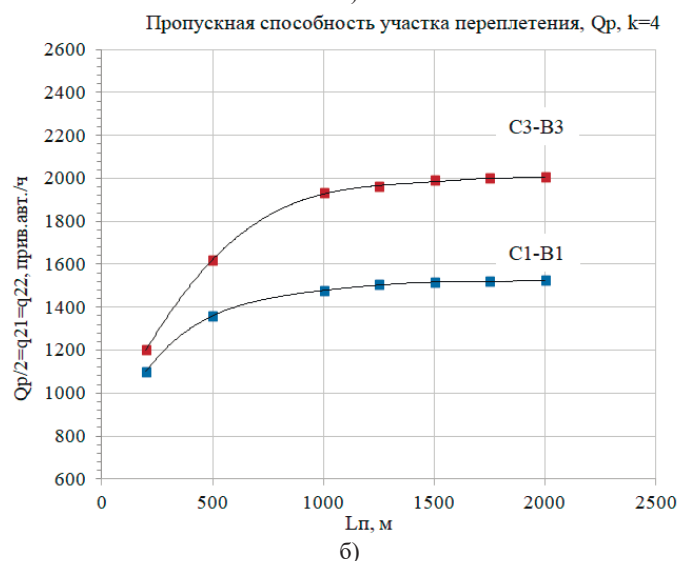
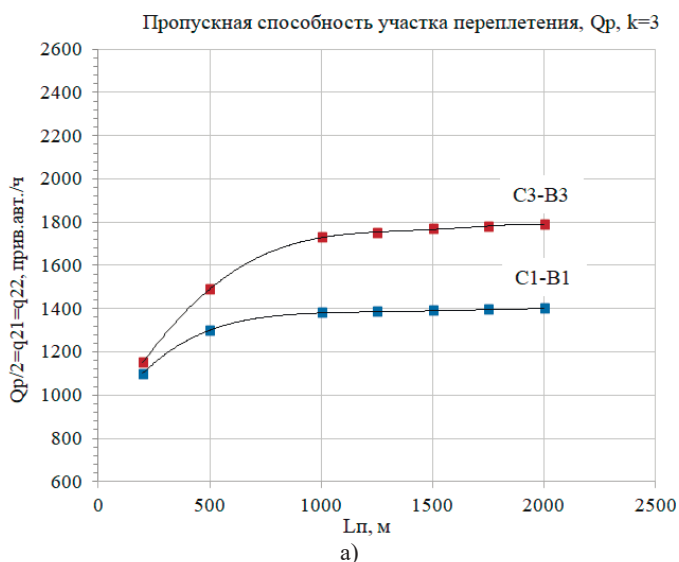


Рис. 2. Зависимости $Q_p = f(L_p, q_{22}, q_{21})$ для уровня удобства движения – «В» $q_{22} = q_{21}$: (а) – для $k=3$, (б) – для $k=4$; (в) – для $k=5$

Результаты проведенного численного эксперимента показывают, что с увеличением расстояний между въездом и съездом (L_p) нелинейно растет пропускная способность участков переплетения Q_p . Наиболее чувствительна величина пропускной способности (Q_p) при изменении длины участка переплетения с $L_p = 250$ м до $L_p = 500$ м. Для шестиполосных дорог увеличение пропускной способности участков переплетения в этих условиях составляет от 21% до 28%, для восьмиполосных и десятиполосных – от 24% до 35% в зависимости от планировочного решения участка сопряжения транспортных потоков (меньшие значения для однополосных переходно-скоростных полос, большие – для двухполосных переходно-скоростных полос). При увеличении длины участка переплетения с $L_p = 500$ м до $L_p = 1000$ м увеличение пропускной способности участков переплетения для шестиполосных дорог составляет от 7% до 18%, для восьмиполосных – от 6% до 20%, для десятиполосных – от 7% до 24% в зависимости от планировочного решения участка сопряжения транспортных потоков. Дальнейшее увеличение длины участков переплетения транспортных потоков не оказывает существенного влияния на показатели пропускной способности.

Учитывая результаты проведенных исследований следует заключить, что взаимное размещение участков сопряжений съездов при проектировании дорог и их реконструкции рекомендуется вести не только с учетом градостроительных условий, но и с учетом интенсивностей движения транспортных потоков.

В условиях сложившейся улично-дорожной сети полученные зависимости $Q_p = f(L_p, q_{22}, q_{21})$ могут быть использованы для решения задачи поиска пропускной способности съездов и въездов при заданном значении длины участка переплетения (L_p).

В условиях устройства новых участков городских дорог скоростного движения в пределах застроенных территорий их рекомендуется располагать таким образом, чтобы проезжую часть въезда и следующего за ним съезда можно было объединить общей дополнительной полосой движения. В таких условиях обеспечивается наибольшее расстояние между въездом и съездом, которое может быть использовано для устройства полос накопления, предназначенных для въезжающих в сеть городских дорог скоростного движения автомобилей длиной $L_{оч}$ (см. рис. 3).

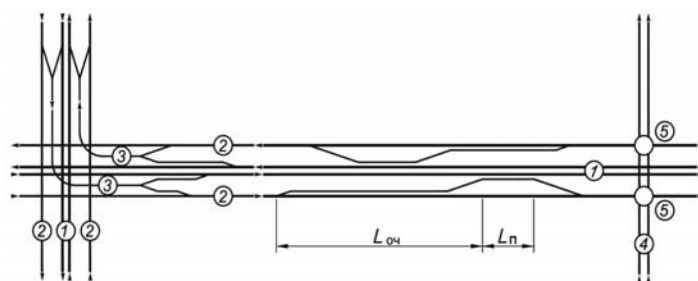


Рис. 3. Общая схема организации въездов на магистральную дорогу скоростного движения: 1 – магистральная городская дорога скоростного движения; 2 – боковой проезд; 3 – съезд пересечения в разных уровнях 1 класса; 4 – магистральная улица районного значения; 5 – пересечение в одном уровне

Обеспечение наибольшей возможной по планировочным условиям длины участка накопления транспортных потоков позволяет увеличить эффективность применения систем контроля интенсивности движения на въездах при устройстве интеллектуальных транспортных систем.

Для ограничения интенсивности движения на въезде рекомендуется применять устройство светофорного объекта на въезде. Расчет режима работы светофорного объекта рекомендуется выполнять с учетом пропускной способности участка переплетения (см. рис. 2 и табл. 2).

Проведенное математическое моделирование режимов движения транспортных потоков позволило получить данные о пропускной способности участков переплетения, что позволяет выполнять оценку уровня удобства движения на участках переплетения при проектировании и эксплуатации городских дорог скоростного движения.

Представленное исследование дает ценную информацию о режимах движения транспортных потоков, но имеет ограничения, обусловленные методикой его проведения. Анализ данных и условий проведения эксперимента показывает, что полученные данные о пропускной способности необходимо интерпретировать с осторожностью, учитывая, что интенсивность движения на съездах и въездах нередко отличаются. В этой связи отмечается необходимость проведения дальнейших исследований с учетом всего спектра условий движения, прежде всего различных интенсивностей движения на съездах, для более точной оценки параметров движения и разработки эффективных мер по оптимизации дорожного движения и построения интеллектуальных транспортных систем городов.

Результаты проведенных исследований рекомендованы к применению для оценки качества транспортного обслуживания и разработки мероприятий по повышению эффективности работы сети дорог скоростного движения в городах России. Результаты исследований также могут быть рекомендованы для применения при проектировании систем интеллектуальных транспортных систем, применяемых для управления движением на съездах и въездах в сеть городских дорог скоростного движения.

Благодарности

Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию (наименование темы научного исследования «Интеллектуальные системы управления развитием улично-дорожной сети городов»; код научной темы, присвоенной учредителем – FEFG-2024-0005).

Литература

1. Михайлов А.Ю., Головых И.М. Современные тенденции в проектировании и реконструкции городских уличных сетей. Новосибирск: Наука, 2004. 267 с.
2. Zhang L., Levinson D. Ramp metering and freeway capacity // Transport Research Part A: Policy and Practice, no. 44(3), 2010, pp. 218-235.
3. Coifman B., Kim S. Extended bottlenecks and the fundamental capacity drop on freeways // Transport Research Part A: Policy and Practice, no. 45(6), 2011, pp. 980-991.

4. Chen D., Ahn S. Capacity drop at extended bottlenecks with merge, diverge, and weave // Transportation Research Part B: Methodological, no. 108(C), 2018, pp. 1-20.
5. Zheng Z. Recent developments and research needs in modeling lane change // Transportation Research Part B: Methodological, no. 60(C), 2014, pp. 16-32.
6. Tianchen Yuan, Faisal Alasiri, Yihang Zhang, Petros A. Ioannou. Evaluation of Integrated Variable Speed Limit and Lane Change Control for Highway Traffic Flow // IFAC-PapersOnLine. Vol. 54, Issue 2, 2021, pp. 107-113, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.06.015>.
7. Yan Z., Yang K., Wang Z., Yang B., Kaizuka T., Nakano K. Intention-based lane-changing and lane-keeping haptic guidance steering system // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, no. 6(4), 2020, pp. 622-633.
8. Xia Y., Qu Z., Sun Z., Li Z. A human-like model to understand surrounding vehicle's lane-changing intentions for autonomous driving // IEEE Transactions on Vehicular Technology, no. 70(10), 2021, pp. 4178-4189.
9. Alizadeh A., Moghadam M., Bicer Y., Ure N.K., Yavas U., Kurtulus C. Automated lane change decision-making using deep reinforcement learning in a dynamic and uncertain highway environment // Proceedings of the 2019 Intelligent Transportation Systems Conference, 2019, pp. 1-6.
10. Li G., Yang Y., Li S., Qu X., Lyu N., Li S.E. Decision making of autonomous vehicles in lane-change scenarios: deep reinforcement learning approaches with risk awareness // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022. P. 134.
11. Zheng Y., Ran B., Qu X., Zhang J., Lin Y. Cooperative lane changing strategies to improve traffic operation and safety near freeway off-ramps in a connected vehicle environment // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 4605-4614.
12. Ali Y., Zheng Z., Haque M.M., Yildirimoglu M., Washington S. Detecting, analyzing, and modeling failed lane-changing attempts in traditional and connected environments // Accident Analysis & Prevention, 2020, vol. 132, no. 10, pp. 1-15.
13. Yu K., Lin L., Alazab M., Tan L., Gu B. Deep learning-based traffic safety solution for autonomous and manual vehicle traffic in a 5G-enabled transportation system // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 4337-4347.
14. Ali Y., Haque M.M., Zheng Z., Washington S., Yildirimoglu M. A hazard-based duration model for quantifying the impact of a connected driving environment on lane-changing safety // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, vol. 98, no. 3, pp. 113-131.
15. Wang C., Sun Q., Guo Y., Fu R., Yuan W. Improving the user acceptability of advanced driver assistance systems based on different driving styles: A case study of lane change warning systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, no. 21(4), 2019, pp. 4196-4208.
16. Wu J., Kulcsár B., Ahn S., Qu X. Emergency vehicle lane pre-clearing: from microscopic cooperation to routing decision making // Transportation Research Part B: Methodological, no. 141(2), 2020, pp. 223-239.
17. Xu H., Zhang Y., Cassandras C.G., Li L., Feng S. A bi-level cooperative driving strategy allowing lane changes // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, no. 120(10), 2020, pp. 1-13.
18. Nie Z., Li Z., Wang W., Zhao W., Lian Y., Outbib R. Gain-scheduling control of dynamic lateral lane change for automated and connected vehicles based on multipoint preview // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, no. 14(3), 2020, pp. 1338-1349.
19. Laval J.A., Leclercq L. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 368, no. 1932, 2010, pp. 4519-4541.
20. Chen D., Ahn S., Laval J., Zheng Z. On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: the role of driver characteristics // Transportation Research Part B: Methodological, vol. 59, 2014, pp. 117-136.
21. Jin W.L., Gan Q.J., Lebacque J.P. A kinematic wave theory of capacity drop // Transportation Research Part B, vol. 81, 2015, pp. 316-329.

22. Zhao S., Chen X., Wang X. Research on the edge resource allocation and load balancing algorithm based on vehicle trajectory // *Complexity*, vol. 2022, p. 5090875, 2022.

23. Rong S., Wang H., Li H., Sun W., Gu Q., Lei J. Performance-guaranteed fractional-order sliding mode control for underactuated autonomous underwater vehicle trajectory tracking with a disturbance observer // *Ocean Engineering*, vol. 263, 2022, p. 112330.

24. Or B., Klein I. Learning vehicle trajectory uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122, 106101.

25. Yang D., Zheng S., Wen C., Jin P.J., Ran B. A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, no. 95, pp. 228-247.

26. Ouyang P., Liu P., Guo Y., Chen K. Effects of configuration elements and traffic flow conditions on lane-changing rates at weaving segments // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, no. 171, 103652.

27. Koscov A.V. Deterministic-stochastic model of traffic flow on multi-lane roads // *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2023. No. 4 (75), pp. 3-12. EDN WNUEDW.

28. Pospelov P., Kostsov A., Tatashev A., Yashina M. A mathematical model of traffic segregation on multilane roads. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, no. 7(1), 2019, pp. 442-446. DOI: 10.21533/pen.v7i1.384. EDN: REDJYZ

29. Косцов А.В. Распределение автомобилей по полосам движения // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2023. № 4. С. 41-44. EDN МНРМQJ.

30. Косцов А.В. Исследование длин участков влияния съездов с многополосных автомагистралей // *Транспортное строительство*. 2019. № 2. С. 16-17. EDN YZGJHX.

31. Косцов А.В. Исследование длин участков влияния въездов на многополосные автомагистрали // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019. № 1(87). С. 20-21. EDN ICMOJL.

CALCULATING THE EASE MOVEMENT LEVEL WITH CREATING INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS ON HIGH-SPEED URBAN ROADS

Roman V. Klyuev, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia;
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Alexey V. Kostsov, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia;
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, kostsov_msfs@bk.ru

Dmitry S. Martyakhin, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia;
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Alan L. Kortiev, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Alexey A. Berko, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract

The increasing demand for intra-urban transportation in the context of high motorization has resulted in the development of a network of urban expressways designed to meet the need for fast and efficient movement within large and megacities. The growth in traffic volumes on urban expressways is significantly outpacing the pace of road and bridge construction. Under these conditions, engineers have shifted from extensively expanding the transportation system to utilizing methods to improve traffic flow and make existing infrastructure more effective. One of the most significant methods for enhancing the efficiency of urban expressway networks is the implementation of intelligent transportation systems that limit vehicle access to roads, enabling high levels of convenience on urban expressways. The development of traffic management strategies at the entry points to the urban express road network necessitates the enhancement of methods for evaluating the capacity and convenience of traffic on the primary thoroughfare, which forms the basis for establishing requirements for the operation of intelligent transportation systems. This article presents the findings of a study that enables the assessment of the level of traffic comfort in areas where traffic streams intersect, with the aim of enhancing traffic convenience on urban expressways, including through the use of intelligent transportation solutions.

Keywords: urban roads, street and road network, intelligent transport systems, level of service, road design.

Acknowledgements

The work was prepared based on the results of research carried out at the expense of the federal budget according to the state assignment (the name of the research topic "Intelligent management systems for the development of the urban street and road network"; the code of the scientific topic assigned by the founder is FEFG-2024-0005).

References

- [1] A. Yu. Mikhailov, I. M. Golovykh, "Modern trends in the design and reconstruction of urban street networks," Novosibirsk: Nauka, 2004. 267 p.
- [2] L. Zhang, D. Levinson, "Ramp metering and freeway capacity," *Transport Research Part A: Policy and Practice*, 2010, no. 44(3), pp. 218-235.
- [3] B. Coifman, S. Kim, "Extended bottlenecks and the fundamental capacity drop on freeways," *Transport Research Part A: Policy and Practice*, 2011, no. 45(6), pp. 980-991.
- [4] D. Chen, S. Ahn, "Capacity drop at extended bottlenecks with merge, diverge, and weave," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, no. 108(C), pp. 1-20.
- [5] Z. Zheng, "Recent developments and research needs in modeling lane change," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, no. 60(C), pp. 16-32.
- [6] Tianchen Yuan, Faisal Alasiri, Yihang Zhang, Petros A. Ioannou, "Evaluation of Integrated Variable Speed Limit and Lane Change Control for Highway Traffic Flow," *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 54, Issue 2, 2021, pp. 107-113, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.06.015>.
- [7] Z. Yan, K. Yang, Z. Wang, B. Yang, T. Kaizuka, K. Nakano, "Intention-based lane-changing and lane-keeping haptic guidance steering system," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2020, no. 6(4), pp. 622-633.
- [8] Y. Xia, Z. Qu, Z. Sun, Z. Li, "A human-like model to understand surrounding vehicle's lane-changing intentions for autonomous driving," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, no. 70(10), pp. 4178-4189.
- [9] A. Alizadeh, M. Moghadam, Y. Bicer, N. K. Ure, U. Yavas, C. Kurtulus, "Automated lane change decision-making using deep reinforcement learning in a dynamic and uncertain highway environment," *Proceedings of the 2019 Intelligent Transportation Systems Conference*, 2019, pp. 1-6.
- [10] G. Li, Y. Yang, S. Li, X. Qu, N. Lyu, S. E. Li, "Decision making of autonomous vehicles in lane-change scenarios: deep reinforcement learning," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, pp. 134.
- [11] Y. Zheng, B. Ran, X. Qu, J. Zhang, Y. Lin, "Cooperative lane changing strategies to improve traffic operation and safety near freeway off-ramps in a connected vehicle environment," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 4605-4614.
- [12] Y. Ali, Z. Zheng, M. M. Haque, M. Yildirimoglu, S. Washington, "Detecting, analyzing, and modeling failed lane-changing attempts in traditional and connected environments," *Accident Analysis & Prevention*, 2020, vol. 132, no. 10, pp. 1-15.
- [13] K. Yu, L. Lin, M. Alazab, L. Tan, B. Gu, "Deep learning-based traffic safety solution for autonomous and manual vehicle traffic in a 5G-enabled transportation system," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 4337-4347.
- [14] Y. Ali, M. M. Haque, Z. Zheng, S. Washington, M. Yildirimoglu, "A hazard-based duration model for quantifying the impact of a connected driving environment on lane-changing safety," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, vol. 98, no. 3, pp. 113-131.
- [15] C. Wang, Q. Sun, Y. Guo, R. Fu, W. Yuan, "Improving the user acceptability of advanced driver assistance systems based on different driving styles: A case study of lane change warning systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, no. 21(4), pp. 4196-4208.
- [16] J. Wu, B. Kulcsar, S. Ahn, X. Qu, "Emergency vehicle lane pre-clearing: from microscopic cooperation to routing decision making," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, no. 141(2), pp. 223-239.
- [17] H. Xu, Y. Zhang, C. G. Cassandras, L. Li, S. Feng, "A bi-level cooperative driving strategy allowing lane changes," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, no. 120(10), pp. 1-13.
- [18] Z. Nie, Z. Li, W. Wang, W. Zhao, Y. Lian, R. Outbib, "Gain-scheduling control of dynamic lateral lane change for automated and connected vehicles based on multipoint preview," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, no. 14(3), pp. 1338-1349.
- [19] J. A. Laval, L. Leclercq, "A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, vol. 368, no. 1932, pp. 4519-4541.
- [20] D. Chen, S. Ahn, J. Laval, Z. Zheng, "On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: the role of driver characteristics," *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, vol. 59, pp. 117-136.
- [21] W. L. Jin, Q. J. Gan, J. P. Lebacque, "A kinematic wave theory of capacity drop," *Transportation Research Part B*, 2015, vol. 81, pp. 316-329.
- [22] S. Zhao, X. Chen, X. Wang, "Research on the edge resource allocation and load balancing algorithm based on vehicle trajectory," *Complexity*, 2022, vol. 2022, p. 5090875.
- [23] S. Rong, H. Wang, H. Li, W. Sun, Q. Gu, J. Lei, "Performance-guaranteed fractional-order sliding mode control for underactuated autonomous underwater vehicle trajectory tracking with a disturbance observer," *Ocean Engineering*, 2022, vol. 263, p. 112330.
- [24] B. Or, I. Klein, "Learning vehicle trajectory uncertainty," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122, 106101.
- [25] D. Yang, S. Zheng, C. Wen, P. J. Jin, B. Ran, "A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, no. 95, pp. 228-247.
- [26] P. Ouyang, P. Liu, Y. Guo, K. Chen, "Effects of configuration elements and traffic flow conditions on lane-changing rates at weaving segments," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, no. 171, 103652.
- [27] A. V. Koscov, "Deterministic-stochastic model of traffic flow on multi-lane roads," *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2023. No. 4 (75), pp. 3-12.
- [28] P. Pospelov, A. Kostsov, A. Tatashev, M. Yashina, "A mathematical model of traffic segregation on multi-lane roads," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2019, no. 7(1), pp. 442-446. DOI: 10.21533/pen.v7i1.1384
- [29] A. V. Koscov, "Distribution of cars by traffic lanes," *Science and technology in the road industry*. 2023, no. 4, pp. 41-44.
- [30] A. V. Koscov, "Study of the lengths of sections of influence of exits from multi-lane highways," *Transport construction*. 2019, no. 2, pp. 16-17.
- [31] A. V. Koscov, "Study of the lengths of sections of influence of entrances to multi-lane highways," *Science and technology in the road industry*. 2019, no. 1 (87), pp. 20-21.

TELEMATIC SYSTEM FOR MONITORING THE CONDITION OF ASSEMBLIES AND UNITS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Nikolay I. Vatin,

Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia;

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia, vatin@mail.ru

Alexey A. Akulov,

State University of Management, Moscow, Russia,; Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia, a.akulov.98@mail.ru

Alexander V. Sukhodolya,

Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia, sualv@mail.ru

Artem V. Podgorny,

State University of Management, Moscow, Russia; Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia, pavtxt@mail.ru

Nikita V. Loganov,

State University of Management, Moscow, Russia; Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia, nikita.loganov.2001@yandex.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-59-65

Manuscript received 8 November 2024;

Accepted 12 December 2024

Keywords: monitoring, agricultural machinery, fault analysis, Internet of things, wireless communication, efficiency improvement

This paper presents a sophisticated telematics system designed to monitor the condition of agricultural machinery in real time, with particular emphasis on predictive maintenance and operational efficiency. The system architecture consists of several key components, including a data acquisition, storage and processing unit, a data transmission module and a specialized set of sensors for analyzing particulate matter in lubricating fluids. The main sensor of the system is a particle counter in the fluid stream, which serves as the primary detection mechanism for monitoring the level of solid contaminants in the lubricating fluid. In addition, data is supplied from the engine control unit via a K-Line communication bus, which allows the monitoring data set to be extended to include key operating parameters. Mobile wireless networks are used for data transmission, providing remote, continuous access to equipment status data, allowing operators and maintenance teams to analyze equipment status regardless of geographic location. This enables early assessment of machine health based on real-time analysis of lubricating fluid. The system monitors key parameters such as particle count, fluid pressure and viscosity, providing valuable insights into wear status and contamination levels that directly affect component longevity. The proposed system is characterized by its ability to anticipate the need for maintenance by evaluating metrics in real time, which enables the identification of preliminary signs of wear or failure. Using anomaly detection algorithms, the system evaluates deviations from established performance standards and generates alerts to notify operators of impending problems. This proactive approach minimizes the occurrence of unexpected equipment failures, thereby reducing downtime. In addition, these systems help optimize equipment performance and improve overall operational efficiency, thereby supporting the long-term sustainability of agricultural equipment in challenging field conditions.

Для цитирования:

Ватин Н.И., Акулов А.А., Суходоля А.В., Подгорный А.В., Логанов Н.В. Телематическая система мониторинга состояния узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 59-65.

For citation:

N. I. Vatin, A. A. Akulov, A. V. Sukhodolya, A. V. Podgorny, N. V. Loganov, "Telematic system for monitoring the condition of assemblies and units of agricultural machinery," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 1, pp. 59-65.

Introduction

Modern agriculture is facing complex challenges provoked by a significant decrease in the number of agricultural machinery with virtually unchanged crop area. According to various estimates, the average age of agricultural machinery is up to 19.5 years, which is almost double the service life. In this regard, agricultural enterprises are experiencing difficulties in maintaining the performance of machinery, which leads to increased downtime, lower productivity and higher financial costs of enterprises.

To address these challenges, farmers are increasingly using technology solutions designed to optimise processes, reduce costs and increase productivity. One of the key elements of this transformation is agricultural machinery monitoring, which provides valuable information to make informed decisions and improve machine utilisation.

Telematics systems collect information on machinery status, location, load, travelling speed and many other metrics, transmitting it to the operator in the cab and to the chief mechanic at the plant in real time.

Paper [1] presents an overview of telemetry systems used for monitoring mobile energy facilities (MEFs). The paper emphasises benefits such as reduced maintenance costs, increased uptime and improved condition management. The study focuses on the use of machine learning and artificial intelligence to predict maintenance and optimise agricultural processes. However, the author lacks specific data or case studies to support his claims and focuses solely on technical aspects, neglecting human factors and safety risks. The monitoring method itself offers advantages such as remote maintenance and early fault detection, but faces challenges such as dependence on digital infrastructure and communication networks, security issues and cost factors. Overall, the study provides valuable information on telemetry-based IOE monitoring systems but needs further refinement to include more in-depth analyses, addressing security and human factors issues for successful implementation.

The study [2] examines the use of a non-contact diagnostic system (GALILEOSKY 7.0) for high power agricultural machinery, demonstrating its ability to collect data, analyse and perform diagnostics. Despite the potential advantages of non-invasiveness and remote access, the study lacks wider comparison with other methods, deeper analysis and qualitative evaluation. The system's dependence on technology, safety concerns, implementation costs and limited technical knowledge require further study to validate its practical utility in modern agriculture.

The study [3] highlights the need for innovative technologies to improve the performance of agricultural machinery and the need for training programmes to train professionals in the use of these technologies. The paper proposes a training simulator that incorporates real world objects and a virtual control centre, but it lacks specific technical details and empirical evidence to support its effectiveness. While monitoring technologies offer potential benefits such as increased efficiency and real-time data, they also raise concerns about technology dependency, data security, implementation costs, and technical skill requirements. Further research is needed to address these concerns and validate the effectiveness of the proposed monitoring system and methods under real agricultural conditions.

When looking at existing products in the field of telematics systems, it can be noted that only a few leading companies and

manufacturers are actively involved in the development and implementation of telematics systems for agribusinesses. These companies offer a wide range of solutions from precision farming tools to advanced data management platforms:

1. John Deere, a major manufacturer of agricultural equipment, has integrated telematics into its equipment with the JDLink system, which enables remote monitoring and diagnostics of tractors, combines and other machinery. The StarFire system offers high-precision GPS for precision farming, including guidance systems for automatic steering and yield mapping.

2. Trimble, known for its leadership in GPS technology, offers advanced telematics solutions for agriculture through its Trimble Ag software. The platform integrates precision farming tools such as flow control, GPS navigation and remote sensing to make it easier for farmers to manage operations based on real-time data.

3. AGCO offers a range of precision farming solutions through its FUSE technologies, which combine technology, telematics and data management. AGCO's telematics platform, AgCommand, monitors equipment performance and helps optimise machinery use and reduce downtime.

4. CNH Industrial: The parent company of brands such as New Holland and Case IH, CNH Industrial uses its AFS Connect telematics platform to support precision farming with features such as vehicle tracking, preventive maintenance and crop data analysis. The platform integrates seamlessly with equipment to optimise operations.

5. Topcon: Topcon, a company specialising in precision positioning technology, offers solutions such as the Topcon Agriculture Platform (TAP), which uses real-time field data to improve decision-making in crop production. Their systems also support automated control and precise application of fertilisers and pesticides.

6. Raven Industries: Raven Industries, a leader in precision agriculture, offers Slingshot, a comprehensive telematics and logistics platform that connects field operations to the back office. The system supports machine-to-machine communication and data-driven decision making for precision agriculture.

7. Yara International: although primarily known for fertiliser, Yara has expanded into precision farming with its Atfarm platform, which combines satellite imagery and plant data to optimise nutrient application. This helps farmers utilise resources more efficiently and increase yields.

These companies play a key role in the development of agro-industrial technologies, and the telematics systems they have developed are improving operational efficiency and sustainability across the entire agricultural value chain.

Most telematics systems collect a wide range of information that provides a comprehensive view of machinery performance and condition. Table 1 summarises the types of data that can be monitored.

Summarising the above, it can be noted that existing products in the field of telematic systems and existing research do not imply installation of additional equipment for diagnostics of agricultural machinery, but are only a superstructure over basic control units and carry out collection, storage, processing and transmission of information of those values, which are received from standard systems.

Table 1
Types of telematics monitoring data

Data Area:	Data type:	Description:
Location	GPS coordinates	The exact location of the technique on the map
	Travelling speed	The speed of the machine at a given time
	Direction of movement	Direction of machine movement
	Movement history	Trajectory of machinery movement over a certain period of time
Operation of machinery	Engine hours	Total motor running time over a certain period of time
	Fuel consumption	Volume of fuel consumed
	Engine speed	Engine revolutions per minute
	Engine temperature	Temperature reading in the motor cooling system
	Oil pressure	Supply of oil to engine parts at a certain pressure
State of the art	Error code	Error codes that occur in the operation of the equipment
	System boot	Percentage of utilisation of various machinery systems
	Oil level	Engine oil level
	Fuel level	Fuel level in the tank
Additional features:	Geo-fences	Setting the geo-fences in which the equipment should be located or from which it should not leave.
	Alerts	Set up alerts for various events, e.g. speeding, machinery stoppage, fuel consumption, faults.

This study proposes to develop a telematics-like system equipped with an additional sensor to determine the amount of solid particles in the lubricant composition. Many studies show that some amount of small solid particles characterised by oil properties are present in the oil of an internal combustion engine from the moment of operation. In the process of internal combustion engine operation, the oil wears out, losing its lubricating properties, which leads to an increase in the rate of wear of friction pairs and a sharp increase in the number of solid particles (Fig. 1).

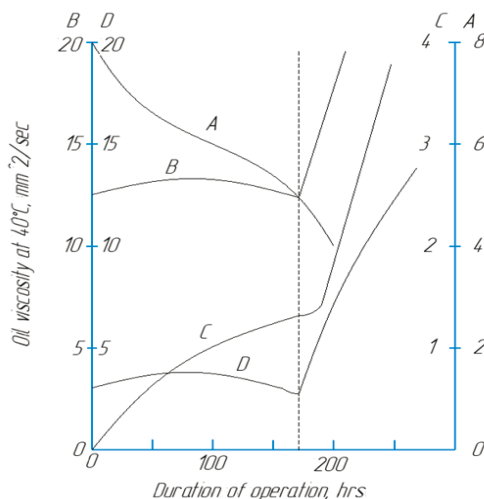


Fig. 1. Dependence of the main characteristics of oil in the process of running time, where: A – total alkalinity; B – oil viscosity; C – amount of insoluble products; D – total acidity

The development of an intelligent telematics system capable of determining the amount of solid particles in the lubricant composition will allow real-time assessment of the oil condition, indicate the need for its replacement, and based on the large data on the oil condition of a particular power unit for the previous period will allow to preventively determine the need for maintenance. Also, untimely and peak growth of solid particles can indicate critical wear of friction pairs and the need for technical repair of the power plant before its failure.

The purpose of this paper is to present the results of the research devoted to the development of an intelligent telematic system, which includes a unit for collecting, storing and processing information, a unit for transmitting information and a sensor (sensor) for determining the amount of solid particles in the oil. The proposed monitoring system is considered as a potential key element of smart agriculture combining efficiency, sustainability and innovation.

Materials and methods

Two systems for monitoring the oil condition of the power unit and drive system components can be applied to agricultural machinery:

1. Telematic system. Allows real-time assessment of lubricant condition and transmission to image output devices and the enterprise server.

2. Manual method. Allows to collect and store information about the state of the lubricant on a carrier inside the technique, and the information is collected and transmitted manually with the help of additional devices or a personal computer. Data processing can be carried out either on the capacity of the unit of collection, processing and storage of information, or on the enterprise server or personal computer.

Both methods require installation of an additional sensor, data collection, processing and storage unit and differ only in the method of data transmission. The most promising for large enterprises is a telematic system that meets the requirements of operational control over the condition of a large fleet of rolling stock.

PC-M600, which is a flow counter of particles in oils and technical liquids, designed for flow measurements under conditions of high pressure and temperature, as well as its analogues, is considered as the main sensor.

The rest of the information required by the telematics system for a more complete assessment of the state of agricultural machinery is proposed to be collected from the control unit of the power plant directly from the single-wire bidirectional bus (K-Line), designed to connect the control units of the vehicle among themselves.

Information on the condition of agricultural machinery can be transmitted for further analysis in several ways:

Mobile communication (GSM/LTE). This type of communication is the most common way of data transmission. The built-in GSM/LTE modem in the machinery is connected to the network of the mobile operator and transmits the information to the server. The scheme of signal transmission from the technique is shown in Figure 2.

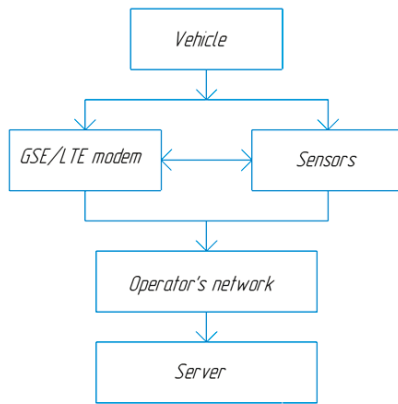


Fig. 2. Mobile phone monitoring scheme

The scheme reflects the standard scheme of data collection via mobile communication when monitoring agricultural machinery and functions as follows:

1. The machinery is equipped with sensors that collect information about the machinery operation (speed, fuel consumption, engine temperature, geolocation, etc.).
2. The sensors transmit the information to a GSM/LTE modem. A modem is a device that allows you to transmit data over a cellular network.
3. GSM/LTE modem transmits data to the operator's network. The operator's network provides communication between the modem and the server.
4. The server receives data from the modem and processes it.

Satellite communication. This type of data transmission is used mainly in remote areas where mobile phone coverage is not available. The satellite modem in the technique establishes a connection with the satellite, which transmits data to the ground station and then to the server. The scheme of signal transmission from the technique to the server is shown in Figure 3.

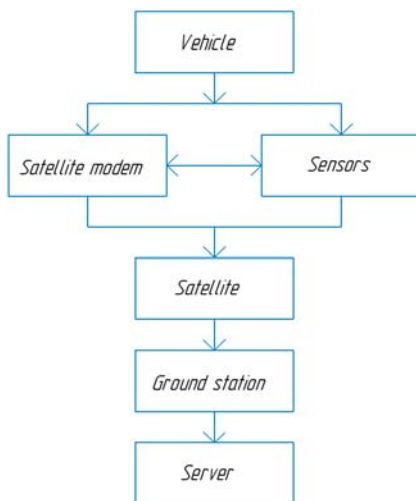


Fig. 3. Satellite-based monitoring scheme

The operation of the system looks like this:

1. the technique is equipped with sensors that collect information about the operation of the technique (speed, fuel consumption, engine temperature, geolocation, etc.).
2. The sensors transmit the information to a satellite modem.
3. The satellite modem receives data from the sensors and transmits it to a satellite in space.

4. The satellite receives data from the modem and transmits it to a ground station.

5. The ground station receives data from the satellite and transmits it to the server.

6. The server processes the data received from the technique, stores it in its database and provides access to it to the user.

Wireless networks (Wi-Fi, Bluetooth). This type of data transmission is used within a short range. The Wi-Fi module in the technique is connected to the wireless network, and the Bluetooth module is connected to the operator's mobile device. The scheme of signal transmission from the equipment to the server is shown in Figure 4.

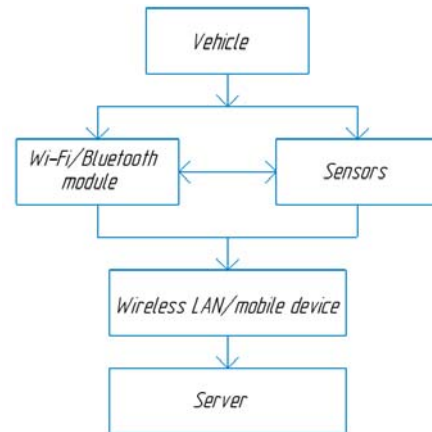


Fig. 4. Monitoring scheme with wireless network

The operation of the system looks like this:

1. The technique is equipped with sensors that collect information about the operation of the technique (speed, fuel consumption, engine temperature, geolocation, etc.).
2. The sensors transmit the information to the Wi-Fi/Bluetooth module installed on the equipment.
3. The Wi-Fi/Bluetooth module receives the data from the sensors and transmits it to the wireless network / mobile device.
4. The wireless network / mobile device receives data from the module and transmits it to the server.
5. The server processes the received data, stores it in a database and provides access to the data to the user.

Table 2 summarises all the advantages and disadvantages of the above methods of transmitting data from agricultural machinery systems to the server for further analysis.

Table 2

Types of telematics monitoring data

Type of communication	Advantages	Disadvantages
Mobile communication	– broad network coverage; – availability; – low cost	– dependence on signal quality; – possible delays in data transmission
Satellite communication	– the largest coverage area; – Independence from terrestrial infrastructure	– high cost of equipment and services; – long data transmission time
Wireless networks	– high data transmission speed; – low cost	– limited range

In any case, all analysed methods of data transfer have a common essence - it is the process of data transfer to the storage, which is the server. First of all, data preprocessing takes place. This is the process of data cleaning from 'noise' and errors, where they are also brought to a single format and scale for further convenience of processing and analysis. The direct storage of information itself takes place in a relational database, which provides structured storage and quick access to materials.

The software part of the intelligent telematics system developed in one of our previous studies with the above set of sensors (sensors) and blocks allows collecting, storing, processing and presenting numerous parameters in various dependencies. Thus, the system is able to collect information passing through the K-Line technique, as well as information from an additional flow-through particulate counter. The main difference of the presented telematic system from the existing ones is the precise determination of lubricant indicators of the power plant and elements of the vehicle drive system, which in combination with self-learning software is able to preventively indicate the need for maintenance and technical repair.

Thus, for example, the system is able to determine the amount of solid particles depending on the oil operating time in motor-hours and to determine the moment of optimal maintenance before a significant change in the oil performance indicators and reduction of lubricating properties. Figure 5 shows an example of data output of the intelligent telematics system, which is programmed in such a way that when approaching 200 motor-hours, the system sends a notification to the image output device and to the server part of the hardware and software complex, and a notification of an imminent need for maintenance.

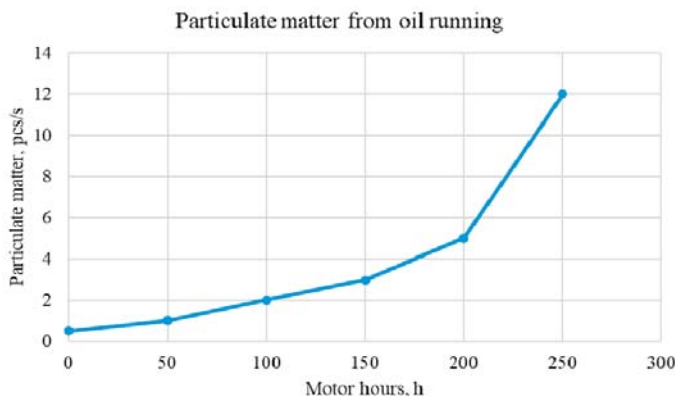


Fig. 5. Example of plotting the dependence of the number of solid particles on the operating time of the lubricant

The telematics system under development is also capable of collecting, storing and processing dozens of other parameters collected via K-Line when vehicle units communicate with each other and present them in a convenient and useful form for operators and chief engineer. Thus, Figure 6 shows the dependence of oil pressure on oil operating hours.

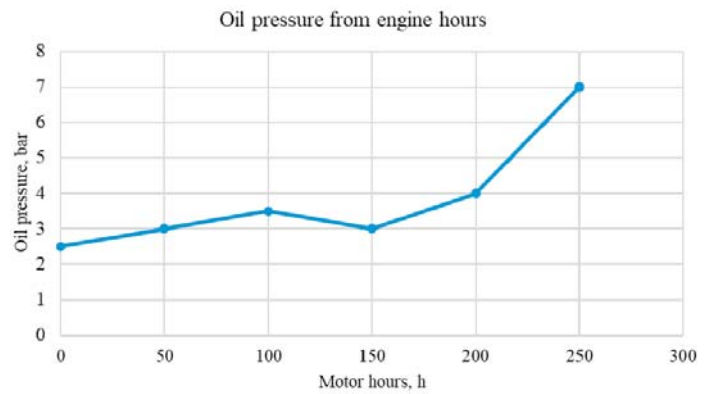


Fig. 6. Example of plotting the dependence of oil pressure in the oil system of the power unit of agricultural machinery on the lubricant runtime

An increase in oil pressure in the oil system of the power plant normally has a positive effect on the service life of the unit, but with oil wear, additive depletion and deterioration of lubricating properties, all the benefits are levelled out and, on the contrary, have a negative effect due to the increased load on the lubrication system of the combustion engine.

These are not the only dependencies and recorded indicators of the telematics system being developed. Complex analysis of the data received by the system due to self-learning intelligent software can significantly improve the operational performance of agricultural machinery, extending the service life, reducing the flow of failures, preventive decision on maintenance and repair work, as well as reducing the financial costs of downtime.

Correct training of programme training on reaction of changes of parameters of machinery in the process of operation, which are of peak character and their change from standard indicators, can be defined as a failure of this or that unit and assembly. For example, an increase in the temperature of exhaust gases with atypical changes in the ignition advance angle and accelerated ageing of the lubricant of the power plant with unchanged environmental parameters and air temperature at the inlet may indicate a malfunction of the fuel system, which is practically impossible to determine by conventional diagnostic equipment before failure, as changes in the nature of the equipment operation may not be noticed.

Results and discussion

Based on the analysis of all the presented types of monitoring, we can conclude that in the agricultural industry, where we are talking about large scale production and where it is necessary to control various types of machinery, the most promising will be the use of telematic type of monitoring with the installation of additional sensors (sensors) and built on intelligent software. In addition to the obvious advantages in the form of modern technology and increased productivity of work when used, the telematic method has the possibility of integration with other types of monitoring, which will allow a more comprehensive approach to the issue of maintenance and control of machinery.

Acknowledgment

The work is based on the results of the research carried out at the expense of the federal budget under the state assignment (the name of the research topic is 'Development of scientific and methodological bases and methods of production and implementation of polymeric, composite materials and lubricating compositions in the interests of the agro-industrial complex of the Russian Federation'; the code of the research topic assigned by the founder - FSFM-2024-0018).

Conclusion

Telematic monitoring of machinery allows you to manage the operation of machinery more efficiently, reduce the cost of its operation and increase labour productivity. Thus, based on research, the use of telematics monitoring leads to changes in the following indicators:

- Reduction in downtime. Thanks to timely detection of malfunctions, it is possible to reduce downtime by 20-30%.
 - Route optimisation. Analysis of data on the movement of equipment allows you to optimise routes, which can reduce travel time by 10-15%.
 - Reducing fuel consumption. Monitoring fuel consumption and optimising engine performance can reduce fuel consumption by 5-10%.
- Improved harvesting efficiency. Tracking harvesting equipment can optimise the harvesting process and increase harvesting efficiency by 5-10%.

References

- [1] S. A. Shishurin, R. D. Goncharov, A. D. Isaev, and S. D. Rossoshansky, "Modern Digital Solutions for Monitoring the State of Mobile Power Equipment," *Problems and Prospects of Agricultural Development: Technical and Agricultural Sciences: Materials of the II Regional Scientific and Technical Conference*, Saratov, 04-18 March 2024, pp. 36-42.
- [2] Yu. V. Kataev, V. S. Gerasimov, and I. A. Tishanyanov, "The use of contactless diagnostics systems in the maintenance of high-energy agricultural machinery," *Technical Service of Machines*, vol. 2, no. 147, pp. 60-66, 2022, doi: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-60-66.
- [3] V. B. Lovkis, N. G. Maltsev, G. I. Gedroit, et al., "On the application of innovative monitoring technologies for the tractor fleet and improvement of training for agricultural specialists," *Innovations in Agriculture*, vol. 4, no. 29, pp. 425-433, 2018.
- [4] A. V. Novitsky, S. E. Tarasenko, and I. S. Kharkivsky, "Monitoring of personnel performance indicators in ensuring the reliability of agricultural machinery," *Scientific Works of SWorld*, vol. 2, no. 1(42), pp. 69-72, 2016.
- [5] M. N. Salihova and B. L. Okhotnikov, "Technologies for monitoring agricultural machinery," *Innovations in Information Technology, Mechanical Engineering and Automotive Transport: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*, Kemerovo, 14-17 October 2019, pp. 325-327.
- [6] D. D. Kharisov, B. A. Sahibgaraev, and U. A. Makhyanov, "Remote monitoring systems for agricultural machinery," *Current Status, Traditions and Innovative Technologies in the Development of the Agro-Industrial Complex: Materials of the International Scientific and Practical Conference within the framework of the XXXIII International Specialized Exhibition "Agrocomplex-2023"*, Ufa, 22-24 March 2023, pp. 118-122.
- [7] A. V. Novitsky, S. E. Tarasenko, and I. S. Kharkivsky, "Monitoring of personnel performance indicators in ensuring the reliability of agricultural machinery," *Scientific Look into the Future*, vol. 2, no. 1, pp. 471-475, 2016.
- [8] V. Ya. Goltuyapin and I. G. Golubev, "Digital monitoring of the condition of the agricultural machinery fleet," *Scientific and Information Support for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex: Materials of the XI International Scientific and Practical Internet Conference*, Pravdinsky, 05-07 June 2019, pp. 256-261.
- [9] P. P. Shaikhutdinov, I. G. Galiev, R. R. Akhmetzianov, and D. R. Fatihov, "Control of the performance of agricultural machinery using a transport monitoring system," *Agriculture and Food Security: Technologies, Innovations, Markets, Personnel: Scientific Works of the II International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 70th Anniversary of the Institute of Mechanization and Technical Service and the 90th Anniversary of the Kazan Zootechnical School*, Kazan, 28-30 May 2020, pp. 37-41.
- [10] V. V. Galushka and V. V. Korotchev, "Requirements for a monitoring system for agricultural machinery," *Alley of Science*, vol. 1, no. 11(62), pp. 1471-1475, 2021.
- [11] A. A. Babchenko, "Effectiveness of the agricultural machinery monitoring project," *Economics and Society*, no. 2(21), pp. 70-73, 2016.
- [12] S. N. Boltovsky, "Monitoring of agricultural machinery," *Innovative Technologies in the AIC, as a Factor in the Development of Science in Modern Conditions: Collection of Materials of the International Scientific and Research Conference Dedicated to the 70th Anniversary of the Creation of the Faculty of TS in the AIC (MEH FAC)*, Omsk, 26 November 2020, pp. 71-75.
- [13] A. V. Fisenko and M. V. Shevchenko, "Telemetry and monitoring systems for agricultural machinery," *Science and Innovations. Artificial Intelligence in the Modern World: Materials of the International Scientific and Practical Conference electronic text edition*, Krasnodar, 27 February 2024, pp. 320-327.

ТЕЛЕМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Ватин Николай Иванович, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия;
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, vatin@mail.ru

Акулов Алексей Андреевич, Государственный университет управления, Москва, Россия;

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, a.akulov.98@mail.ru

Суходоля Александр Валерьевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, sualv@mail.ru

Подгорный Артем Велимирович, Государственный университет управления, Москва, Россия;

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, pavtxt@mail.ru

Логанов Никита Витальевич, Государственный университет управления, Москва, Россия;

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия,
nikita.loganov.2001@yandex.ru

Аннотация

В данной статье представлена сложная телематическая система, предназначенная для мониторинга состояния сельскохозяйственной техники в режиме реального времени, с особым акцентом на предиктивное обслуживание и эффективность эксплуатации. Архитектура системы состоит из нескольких ключевых компонентов, включая блок сбора, хранения и обработки данных, модуль передачи данных и специализированный набор датчиков для анализа содержания твердых частиц в смазочных жидкостях. Основным датчиком системы является счетчик частиц в потоке жидкости, который служит основным механизмом обнаружения для контроля уровня твердых загрязняющих веществ в смазочной жидкости. Кроме того, данные поступают от блока управления двигателем по коммуникационной шине K-Line, что позволяет расширить набор данных мониторинга за счет основных эксплуатационных параметров. Для передачи данных используются мобильные беспроводные сети, обеспечивающие удаленный непрерывный доступ к данным о состоянии оборудования, что позволяет операторам и группам технического обслуживания анализировать состояние оборудования независимо от географического положения. Это позволяет заблаговременно оценить состояние машины на основе анализа смазочной жидкости в режиме реального времени. Система отслеживает такие ключевые параметры, как количество частиц, давление жидкости и вязкость, предоставляя ценные сведения о состоянии износа и уровне загрязнения, которые непосредственно влияют на долговечность компонентов. Предложенная система отличается способностью предвидеть необходимость технического обслуживания путем оценки показателей в режиме реального времени, что позволяет выявлять предварительные признаки износа или отказа. Используя алгоритмы обнаружения аномалий, система оценивает отклонения от установленных норм производительности и генерирует предупреждения для оповещения операторов о надвигающихся проблемах. Такой превентивный подход позволяет свести к минимуму возникновение непредвиденных отказов оборудования, тем самым сокращая время простоя. Кроме того, данные системы способствуют оптимизации производительности техники и повышению общей эффективности работы, тем самым поддерживая долгосрочную устойчивость сельскохозяйственной техники в сложных полевых условиях.

Ключевые слова: мониторинг, сельскохозяйственная техника, анализ неисправностей, Интернет вещей, беспроводная связь, повышение эффективности.

Литература

1. Шишурин С.А., Гончаров Р.Д., Исаев А.Д., Россошанский С.Д. Современные цифровые решения для мониторинга состояния мобильной энергетической техники // Проблемы и перспективы развития АПК: Технические и сельскохозяйственные науки: Материалы II региональной научно-технической конференции, Саратов, 04-18 марта 2024. С. 36-42. EDN KGKXUM
2. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишаньнов И.А. Применение систем бесконтактной диагностики при обслуживании энергоемкой сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. Т. 2, № 1. С. 115-116. 147. С. 60-66, 2022. doi: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-60-66. EDN CMOALX
3. Ловкис В.Б., Мальцев Н.Г., Гедройт Г.И. и др., О применении инновационных технологий мониторинга тракторного парка и совершенствовании подготовки специалистов сельского хозяйства // Инновации в сельском хозяйстве. Т. 4, № 29. С. 425-433, 2018. EDN VOSWZO
4. Новицкий А.В., Тарасенко С.Е., Харьковский И.С. Мониторинг показателей эффективности работы персонала в обеспечении надежности сельскохозяйственной техники // Научные труды SWorld. Т. 2, № 2, 1(42). С. 69-72, 2016. EDN VWEYML
5. Салихова М.Н., Охотников Б.Л. Технологии мониторинга сельскохозяйственной техники", Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автомобильном транспорте // Материалы III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 14-17 октября 2019. С. 325-327, EDN KCWSXW
6. Харисов Д.Д., Сахибгараев Б.А., Махиянов У.А. Системы дистанционного мониторинга сельскохозяйственной техники // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК: Материалы Международной научно-практической конференции в рамках XXXIII Международной специализированной выставки "Агрокомплекс-2023", Уфа, 22-24 марта 2023. С. 118-122. EDN WOOWZF
7. Новицкий А.В., Тарасенко С.Е., Харьковский И.С. Мониторинг показателей эффективности работы персонала в обеспечении надежности сельскохозяйственной техники // Научный взгляд в будущее. Т. 2, № 1. С. 471-475, 2016. EDN WHBENH
8. Гольяпин В.Я., Голубев И.Г. Цифровой мониторинг состояния парка сельскохозяйственной техники // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XI Международной научно-практической интернет-конференции, Правдинский, 05-07 июня 2019. С. 256-261, EDN GOTGLF
9. Шайхутдинов П.П., Галиев И.Г., Ахметзянов Р.Р., Фатихов Д.Р. Контроль производительности сельскохозяйственной техники с использованием системы мониторинга транспорта // Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры: научные труды II Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Института механизации и технического сервиса и 90-летию Казанского зоотехнического техникума, Казань, 28-30 мая 2020. С. 37-41. EDN DRHSQO
10. Галушка В.В., Коротчев В.В. Требования к системе мониторинга сельскохозяйственной техники // Аллея науки. Т. 1, № 11(62). С. 1471-1475, 2021. EDN LOHBRG
11. Бабченко А.А. Эффективность проекта мониторинга сельскохозяйственной техники // Экономика и общество, № 2(21). С. 70-73, 2016, EDN VXBJQT.
12. Болтовский С.Н. Мониторинг сельскохозяйственной техники // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (ФТС АПК), Омск, 26 ноября 2020. С. 71-75. EDN YMUBXT
13. Фисенко А.В., Шевченко М.В. Системы телеметрии и мониторинга сельскохозяйственной техники // Наука и инновации. Искусственный интеллект в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции. Электронное текстовое издание. Краснодар, 27 февраля 2024. С. 320-327. EDN EDNNIU