

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА
– ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА:**

Будко П.А. Ученый секретарь ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА
(Председатель редколлегии):**

Кулешов И.А. Заместитель генерального директора по научной работе ПАО «Интелтех». Д.т.н., доцент

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

Катанович А.А. Главный научный сотрудник НИИ ОСИСВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Н.Г. Кузнецова». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ. Заслуженный работник связи РФ. Заслуженный изобретатель РФ

Кузичкин А.В. Главный научный сотрудник Научно-исследовательского института телевидения Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Курносов В.И. Главный специалист ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный работник связи РФ

Мирошников В.И. Генеральный конструктор ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Половинкин В.Н. Научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Присяжнюк С.П. Генеральный директор ЗАО «Институт телекоммуникаций». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Чуднов А.М. Профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Д.т.н., профессор

Яшин А.И. Заместитель генерального конструктора – научный руководитель работ ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Винограденко А.М. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

Габриэлян Д.Д. ФНПЦ «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону). Д.т.н., профессор

Густов А.А. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор

Дорогов А.Ю. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

Куприянов А.И. Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). Д.т.н., профессор

Легков К.Е. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). К.т.н., доцент

Липатников В.А. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Макаренко С.И. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Минаков В.Ф. Санкт-Петербургский государственный экономический университет (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Михайлов Р.Л. Череповецкий военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (г. Череповец). Д.т.н.

Одоевский С.М. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Пашинцев В.П. Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

Путилин А.Н. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Федоренко В.В. Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

Финько О.А. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (г. Краснодар). Д.т.н., профессор

Цимбал В.А. Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов). Д.т.н., профессор

Семенов С.С. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Саенко И.Б. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Стародубцев Ю.И. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор

Титков И.В. Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**EDITORIAL BOARD CHAIRMAN
– JOURNAL EDITOR-IN-CHIEF:**

Budko P.A. Academic Secretary of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor

**JOURNAL DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF
(Editorial Board Chairman):**

Kuleshov I.A. Deputy General Director for Scientific Work of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS:

Katanovich A.A. Chief Research Officer of the ISIS Institute of the Navy WUNCC Navy "N.G. Kuznetsov Naval Academy". Doctor of Technical Sciences, professor. Honored Inventor of the Russian Federation

Kuzichkin A.V. Chief Research Officer of the Television Research Institute. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Science Worker of the Russian Federation.

Kurnosov V.I. Chief Specialist of PJSC "Inteltech". Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Communications of the Russian Federation.

Miroshnikov V.I. General Designer of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

Polovinkin V.N. Scientific Head of FSUE Krylovsky State Scientific Center, Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Science of the Russian Federation

Prisyazhnik S.P. Director General of CJSC Institute telecommunications. Doctor of Technical Sciences, professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

Chudnov A.M. Department Professor of the Communications Military Academy named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenniy. Doctor of Technical Sciences, Professor

Yashin A.I. Deputy General Designer – Scientific Supervisor of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Vinogradenko A.M. Military Academy of Communications (St. Petersburg) Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Gabrielyan D.D. FNPC "Rostov-on-Don Scientific Radio Research Institute"(Rostov-On-Don). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Gustov A.A. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Military Sciences, Professor

Dorogov A.Y. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Kupriyanov A.I. Moscow Aviation Institut (National Research Universit) Doctor of Technical Sciences, Professor

Legkov C.E. Military Space Academy of A.F. Mozhaiskiy (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Lipatnikov V.A. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Makarenko S.I. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Minakov V.F. St. Petersburg State Economic University (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Mikhailov R.L. Cherepovets Military Order of Zhukov University of Asche Radioelectronics (Cherepovets). Doctorate of Technical Sciences. Associate Professor.

Odoevsky S.M. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Pashintsev V.P. North Caucasus Federal University (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, Professor

Putilin A.N. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Fedorenko V.V. North Caucasus Federal University. (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, professor

Finko O.A. Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Stemenko (Krasnodar). Doctor of Technical Sciences, Professor

Tsymbal V.A. Branch of the Great Petr RVSN Military Academy (Serpukhov). Doctor of Technical Sciences, Professor

Semenov S.S. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Saenko I.B. Saint Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Sciences Russian Academy (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Starodubtsev Y.I. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Military Sciences, Professor

Titkov I.V. Military Educational and Scientific Center of the Navy "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

РЕДАКЦИЯ:

Верстка принт-макета: **Мамончикова А.С.**
Дизайн обложки: **Шаутин Д.В.**
Поддержка сетевой версии журнала: **Тюкинеева Л.В.**
Секретарь редакции: **Михайлова Н.В.**

**АДРЕС
РЕДАКЦИИ:**

197342. Россия. г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, дом 8,
Телефон: +7(812) 542-90-54; +7(812) 448-95-97; +7(812) 448-96-84
Факс: +7(812) 542-18-49. E-mail: mce-journal@inteltech.ru.
Официальный сайт: www.inteltech.ru; www.mce-journal.ru



Научно-технический журнал «Техника средств связи» – это рецензируемое научное издание, в котором публикуются результаты научных исследований специалистов в области современных инфокоммуникационных технологий и автоматизированных систем управления, средств связи и информационной безопасности. Журнал является правопреемником издававшихся с 1959 года Министерством промышленности средств связи СССР всесоюзных журналов «Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи» и «Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи». С 1975 года журнал издается под названием «Техника средств связи». Учредитель и издатель журнала: Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Адрес учредителя и издателя журнала: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д.8.

Адрес типографии: 623102, Свердловская область, г. Первоуральск. пр. Ильича д.26А, АО «Первоуральская типография».

Главный редактор журнала-Председатель редакционного совета - П.А. Будко, Ученый секретарь ПАО «Интелтех», Д.т.н., профессор.

Решением ВАК № 222-р от 10.06.2024 научно-технический журнал «Means of communication equipment» («Техника средств связи») включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и рекомендован ВАК для публикаций основных результатов по научным специальностям: 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения; 2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии; 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций; 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей; 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (по отраслям науки - технические науки).

Выходит 4 раза в год.

Публикация в журнале является научным печатным трудом.

Основное содержание издания представляет собой научные статьи и научные обзоры.

Возрастное ограничение 12 +

Журнал зарегистрирован как сетевое и печатное издания в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельства о регистрации средств массовой информации: ПИ № ФС 77 – 80135 и ЭЛ № ФС 77 – 80136 от 31.12.2020 г.

ISSN (print): 2782-2141; ISSN (online): 2782-2133; РИНЦ (eLIBRARY ID: 77074)

Распространяется по подписке. Подписной индекс журнала-79656. Ссылки для оформления интернет-подписки на журнал:

<https://www.akc.ru/itm/means-of-communication-equipment/>; <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/e79656/>

Свободная цена

Тираж: 40 экз.

Подписано в печать 19.03.2025. Дата выхода в свет 20.03.2025

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Шаповалов Ф. А. 2
Разработка дипольной антенны для диапазонов 2,4 и 5 ГГц

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Сафиулов Д. М. 12
Аналитическая модель процесса мониторинга технического состояния техники связи узла связи специального назначения

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Типикин А. А., Густов А. А. 33
Методика прогнозирования непреднамеренных радиопомех в диапазоне 0,01–30 МГц и ее программная реализация
Манилюк Е. П., Гречишникова Т. А. 49
Методика прогнозирования потерь техники связи в условиях деструктивных воздействий

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Бердюгин И. С. 57
Метод перераспределения ресурсов в подсистеме восстановления военной техники связи

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Ишмиев И. И., Логинов С. С. 64
Средство снижения пик-фактора сигналов FBMC с вариативными критериями останова подбора фаз в методе PTS

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Владимирова Е. С., Салюк Д. В., Саяркин Л. А., Парашук И. Б. 72
Информационно-лингвистическое обеспечение процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров: анализ и формулировка современных требований
Буравлев А.С., Демидова Д.Е., Ткачева Е.А. 84

- Анализ качества реконструкции бизнес-процессов с помощью языковой модели ChatGPT

CONTENTS

COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Shapovalov F. A. 2
Development of a dipole antenna for 2,4 and 5 GHz bands

MODELING OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

- Safullulov D.M. 12
Analytical model of the process of monitoring the technical condition of communication equipment of a special-purpose communication center

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS

- Tipikin A. A., Gustov A. A. 33
Radio noise forecasting technique in 0,01–30 MHz frequency band and its software implementation
Maniliuk E. P., Grechishnikova T. A. 49
Methodology for predicting losses of communication equipment under destructive emergency conditions

CONTROL SYSTEMS

- Berdyugin I.S. 57
Method of resource redistribution in the subsystem of restoration of military communication equipment

ELECTRONIC AND RADIO ENGINEERING SYSTEMS

- Ishmiev I. I., Loginov S. S. 64
A means of reducing the peak-to-average power ratio of FBMC signals with variable stopping criteria for phase selection in the PTS method

COMPUTING SYSTEMS

- Vladimirova E. S., Salyuk D. V., Sayarkin L. A., Parashchuk I. B. 72
Information and linguistic support of procedures and hardware and software for implementing search queries on data center resources: analysis and formulation of modern requirements
Buravlev A.S., Demidova D.E., Tkacheva E.A. 84
Analysis of business process reconstruction quality using ChatGPT language model

Рубрики журнала: Анализ новых технологий и перспектив развития техники средств связи • Системы управления •
• Передача, прием и обработка сигналов • Системы связи и телекоммуникации • Перспективные исследования •
• Вычислительные системы • Информационные процессы и технологии. Сбор, хранение и обработка информации •
• Моделирование сложных организационно-технических систем • Вопросы обеспечения информационной безопасности •
• Интеллектуальные информационные системы • Робототехнические системы • Электронные и радиотехнические системы •
• Объекты интеллектуальной собственности и инновационные технологии в области разработки средств телекоммуникаций

СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-2-11

Разработка дипольной антенны для диапазонов 2,4 и 5 ГГц

Шаповалов Ф. А.

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ двухдиапазонных миниатюрных антенн, предназначенных для работы в стандартах Wi-Fi 4 – 6 (IEEE802.11n, IEEE802.11ac, IEEE802.11ax). На основании полученных характеристик, оказалось, что предлагаемые разработки имеют ряд недостатков, снижающих эффективность их использования в составе носимых мобильных точек доступа. Поскольку с каждым годом растет функциональность и уменьшаются массогабаритные параметры приёмо-передающих устройств, актуализировалась задача создания новых антенн, соответствующих более строгим критериям. **Целью работы** является разработка энергоэффективной и компактной антенны, размещенной внутри корпуса носимой точки доступа. Необходимо обеспечить в двух частотных диапазонах Wi-Fi (2,4 – 2,48 ГГц, 5,15 – 5,93 ГГц) коэффициент стоячей волны по напряжению не более двух, при этом ширина луча диаграммы направленности в азимутальной плоскости по уровню минус 3 дБи должна быть не менее 195 градусов. **К результатам работы** следует отнести создание модели двухдиапазонной дипольной антенны, которая представляет собой диэлектрическую подложку с размещенными на двух её сторонах идентичными излучателями, расположенными симметрично относительно плоскости платы и соединенными между собой сквозными металлизированными отверстиями. Каждый из излучателей представляет собой два электрически связанных симметричных вибратора разной конфигурации и длины. В результате оптимизации конструкции в программе «CST Studio Suite» удалось добиться значений коэффициента стоячей волны по напряжению не более 1,5 в требуемых диапазонах. При этом диаграмма направленности на частоте 2,4 ГГц всенаправленная в горизонтальной плоскости, а во второй полосе рабочих частот имеет кардиоидную форму с шириной луча от 199 до 224 градусов. **Практическая значимость:** разработанная антенна повышает дальность и качество связи, при габаритах схожих с конкурентами. Это предоставляет возможность интегрировать ее в уже существующие устройства, повышая эффективность их работы.

Ключевые слова: двухдиапазонная антенна, дипольная антенна, планарная антенна, Wi-Fi, носимые мобильные устройства.

Введение

В настоящее время стандарты беспроводной связи Wi-Fi остаются одним из важнейших элементов цифровой инфраструктуры. С увеличением скорости передачи данных и ростом числа устройств первоочередную важность обретает задача обеспечения стабильного соединения.

Основными частотными диапазонами Wi-Fi сетей являются 2,4 – 2,48 ГГц, 5,15 – 5,93 ГГц. В диапазоне 2,4 ГГц, часто возникает перегруженность эфира, а также имеются помехи от других устройств, что негативно сказывается на качестве связи. В то же время диапазон 5 ГГц предлагает более высокую скорость передачи данных и меньшую загруженность, однако имеет ограниченный радиус действия из-за более высокой частоты. Двухдиапазонные антенны позволяют эффективно использовать преимущества обоих диапазонов, обеспечивая стабильное соединение как в условиях высокой плотности одновременно работающих устройств, так и на больших расстояниях.

Для устройств, к которым предъявляются повышенные требования по массогабаритным параметрам, наиболее актуальными являются планарные коллинеарные и вибраторные антенны (рис. 1, 2). Первые применяются, как правило, в маршрутизаторах и обладают достаточно высокими значениями коэффициента усиления (КУ) (3 – 6 дБи), но имеют плохое согласование и большие размеры, что не позволяет их интегрировать в состав корпуса приемо-передающего устройства. Вторые, напротив, при меньших габаритах

обладают лучшим согласованием, но пиковое усиление не превышает 3 дБи. Оба вида антенн характеризуются всенаправленной диаграммой направленности (ДН) в азимутальной плоскости, что является недостатком, поскольку для устройств, прилегающих к телу человека наиболее эффективны антенны с кардиоидной формой ДН.

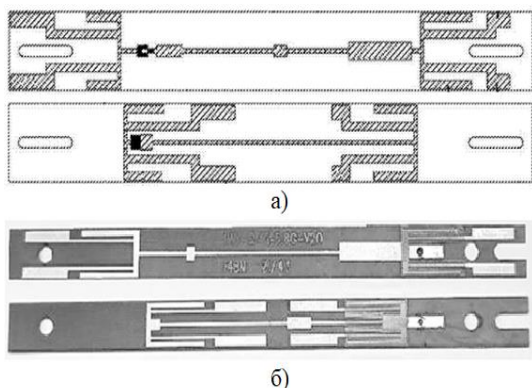


Рис. 1. Коллинеарные антенны

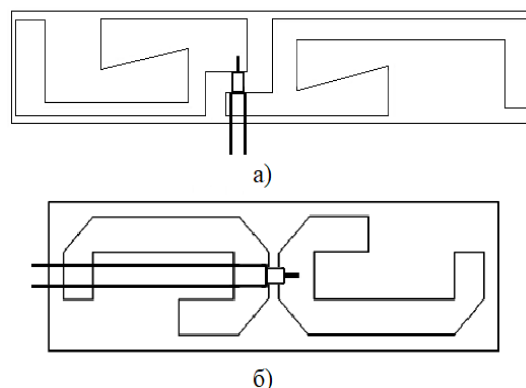


Рис. 2. Планарные вибраторные антенны

Поэтому в АО «НИИ «Нептун» было принято решение выполнить инициативную разработку двухдиапазонной антенны, размещенной внутри корпуса носимой мобильной точки доступа. В результате моделирования удалось добиться значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ) не более 1,5 в требуемых диапазонах и получить необходимую форму ДН во второй полосе частот с максимальным усилением 6,12 дБи.

Патентный поиск

Коллинеарная двухдиапазонная антенна (рис. 1, а) является разработкой компании *Changshu Hongbo Communication Technology Co Ltd* [1]. Она применяется в маршрутизаторах и представляет собой печатную плату, на одной стороне которой размещены излучатели, а на противоположной – симметричные противовесы, обеспечивающие равномерное и синфазное распределение тока по всей антенне. Излучатель представляет собой две пары параллельно расположенных четвертьволновых проводников, длина которых соответствует частотам 2,45 и 5,5 ГГц. В работе также представлен график КСВ антенны (рис. 3).

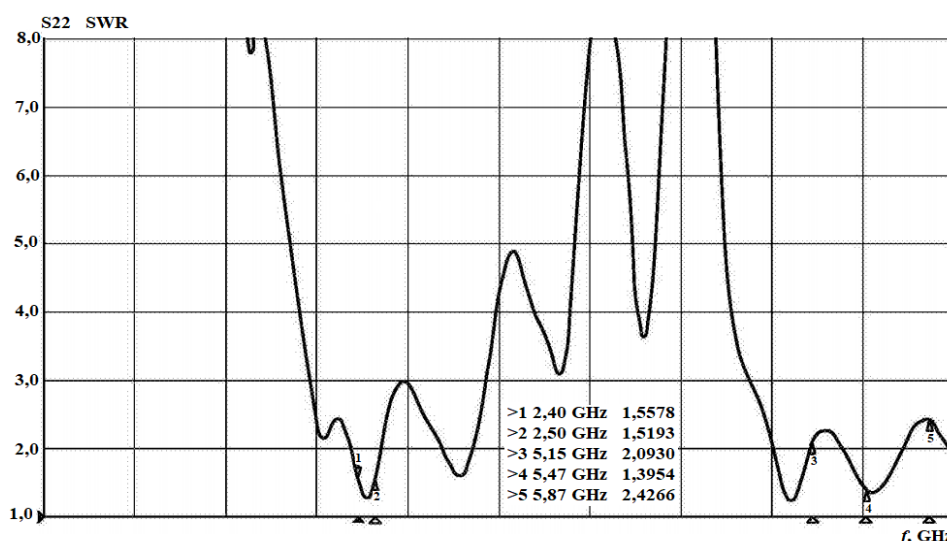


Рис. 3. График КСВ антенны [1]

Из представленного графика видно, что на граничных частотах стандарта 5 ГГц значения КСВ варьируются в интервале от 2 до 2,4, что свидетельствует о плохом согласовании антенны.

Антенна [2] (рис. 1, б), является разработкой компании «Keenetic» – крупнейшего производителя сетевого оборудования. Поскольку очевидно сходство с ранее рассмотренной полезной моделью, но при этом в работе [1] отсутствует графическое представление КУ, было выполнено моделирование антенны в программе «CST Studio Suite» (рис. 4) для уточнения характеристик.

На рис. 5 демонстрируется зависимость КСВ от частоты, а на рис. 6 и рис. 7 содержится график КУ в азимутальной и вертикальной плоскости соответственно.

График КСВ идентичен ранее представленному на рис. 3, за исключением того, что рассогласование антенны находится не на краях диапазона 5 ГГц, а на центральной частоте.

Благодаря симметричной структуре излучателей и противовесов главный лепесток ДН не отклоняется от горизонтального направления, а КУ антенны не имеет провалов в азимутальной плоскости, что подтверждает эффективность ее использования в маршрутизаторах. Максимальное значение КУ в требуемых диапазонах изменяется в пределах 3,2 – 6,1 дБи. Размеры двух рассмотренных антенн сведены в табл. 1.

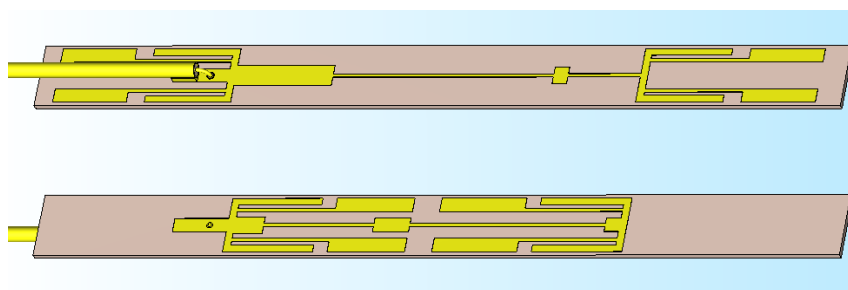


Рис. 4. Модель коллинеарной антенны [2] в программе «CST Studio Suite»

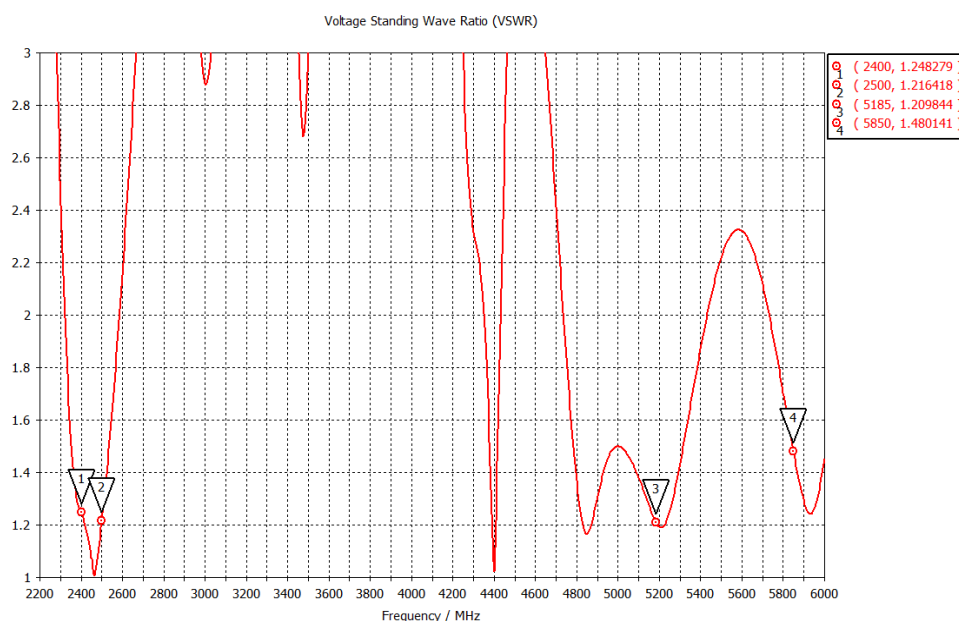


Рис. 5. Рассчитанный график КСВ антенны [2]

Обратим внимание на планарные вибраторные антенны [3, 4] (рис. 2). Конструктивно они представляют собой два диполя, развернутых на 180 градусов относительно геометрического центра антенны. Длина меньшего из диполей равна половине длины волны центральной частоты верхнего диапазона (5,5 ГГц), а большего – половине длины волны центральной частоты нижнего диапазона (2,4 ГГц). На рис. 8 представлены электрические размеры антенны [4], длина диполей отклоняется от теоретического значения из-за влияния диэлектрической подложки и ширины излучателей.

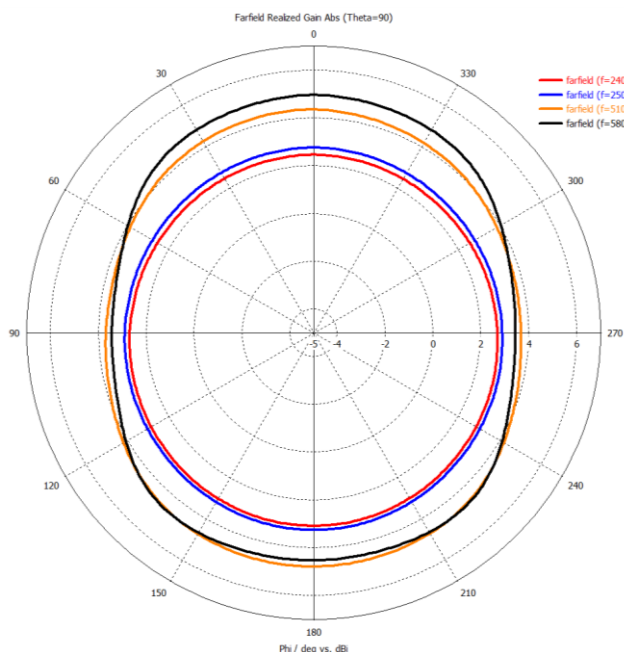


Рис. 6. КУ антенны [2] в азимутальной плоскости

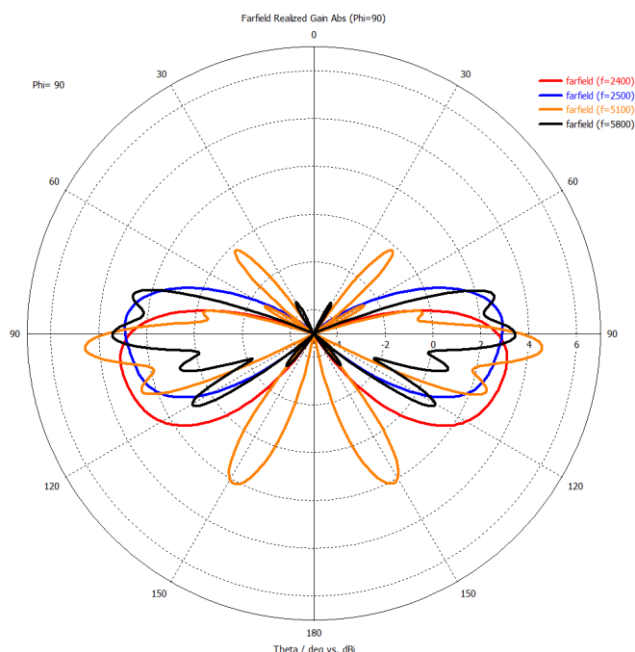


Рис. 7. КУ антенны [2] в вертикальной плоскости

Таблица 1 – Основные размеры рассмотренных коллинеарных антенн

Параметр	Антенна производства Changshu Hongbo Communication Technology	Антенна производства «Keenetic»
Длина платы, мм	109	111,5
Ширина платы, мм	14,5	9
Высота платы, мм	0,6	0,8

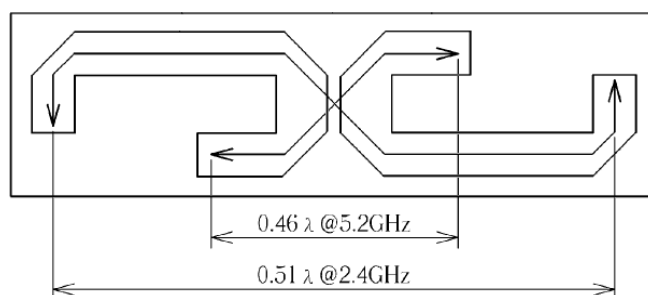


Рис. 8 – Электрические размеры антенны [4]

График коэффициента отражения S_{11} и ДН в полярной системе координат на частотах 2,45 ГГц, 5,15 ГГц и 5,85 ГГц полезной модели [4] представлены на рис. 9 – 12 соответственно. Антенна имеет хорошее согласование в требуемых диапазонах, максимум излучения сохраняется в направлении горизонтальной плоскости, при этом значение КУ не превышает 3 дБи.

Рассмотренные выше антенны имеют ряд характеристик, не позволяющих эффективно их применять в мобильных приеме-передающих устройствах. Так, антенны [1, 2] обладают большими габаритами, а КСВ превышает 2 в диапазоне Wi-Fi 5 ГГц. У планарных антенн [3, 4] КУ не превосходит 3 дБи. Также, все антенны имеют всенаправленную ДН в азимутальной плоскости. Это необходимо в маршрутизаторах, но при использовании в мобильных устройствах непосредственно прилегающих к телу человека большей эффективностью обладает кардиоидная форма ДН в горизонтальной плоскости. В исследовательской работе [5] было оценено влияние человеческого тела на беспроводные сети, работающие на частоте 2,4 ГГц.

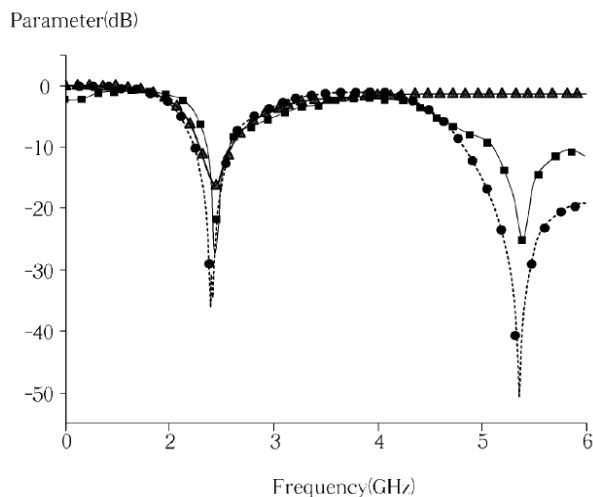


Рис. 9. График коэффициента отражения антенны [4]

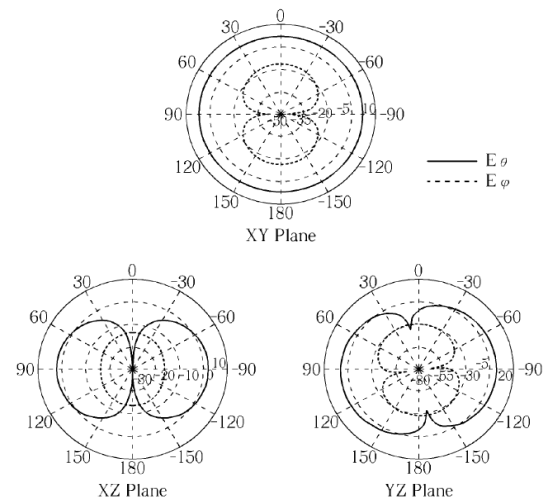


Рис. 10. КУ антенны [4] на частоте 2,45 ГГц

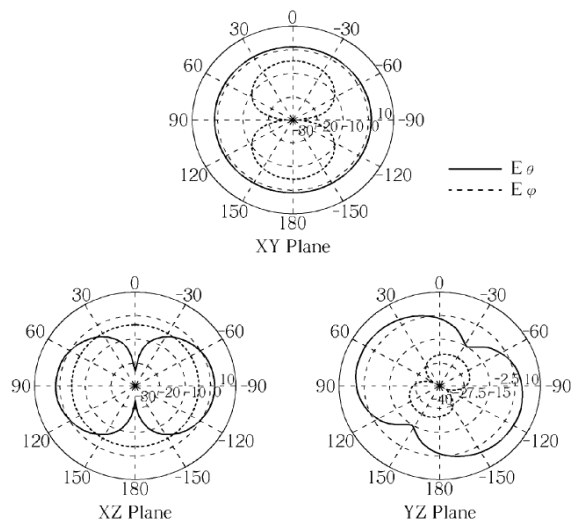


Рис. 11. КУ антенны [4] на частоте 5,15 ГГц

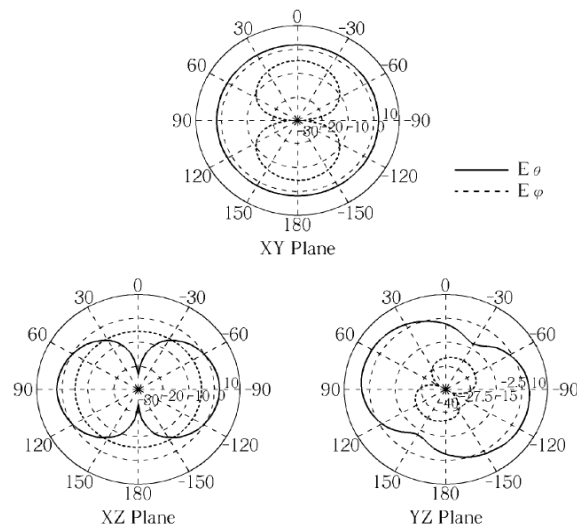


Рис. 12. КУ антенны [4] на частоте 5,85 ГГц

На рис. 13 приведен результат моделирования, свидетельствующий о том, что потери в тракте возрастают до 20 дБ, проходя через тело человека. Рассмотренные на рис. 14 варианты расположения приёмо-передатчика, подтверждают факт того, что для носимых мобильных устройств достаточно ДН с шириной луча не менее 195 градусов и не более 230 градусов по уровню минус 3 дБи относительно максимума усиления.

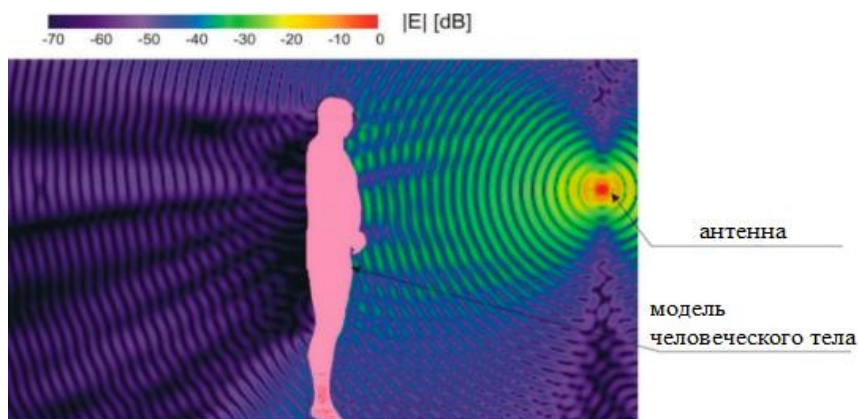


Рис. 13. Влияние тела человека на мощность излучающего сигнала

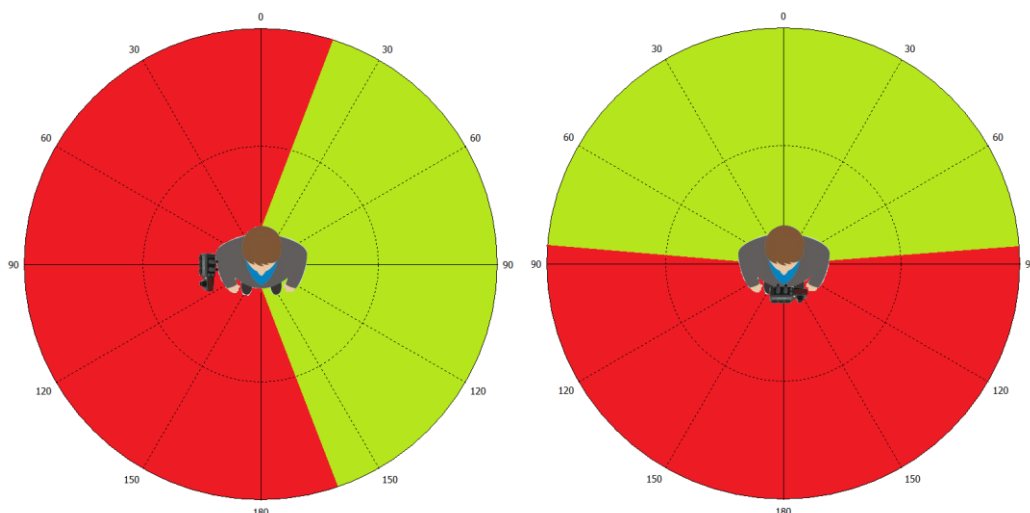


Рис. 14. Оптимальная ширина диаграммы направленности при различном размещении приёмно-передающего устройства

Выбор конструкции проектируемой антенны

На основе рассмотренных антенн и патентов был выполнен анализ и сделан выбор конструкции для дальнейшего расчёта и проектирования. За основу проектируемой антенны была взята двухдиапазонная дипольная антенна, представленная в [6].

На рис. 15 показано устройство заявленной в [6] полезной модели. Антенна представляет собой диэлектрическую подложку с размещенными на двух её сторонах идентичными излучателями, расположенными симметрично относительно плоскости платы и соединенными между собой сквозными металлизированными отверстиями. Излучатель состоит из двух электрически связанных симметричных вибраторов разной конфигурации и длины. Размеры диполя (1) соответствуют частотному диапазону стандарта 2G (GSM-900), а длина диполя (2) – стандарту 3G (UMTS).

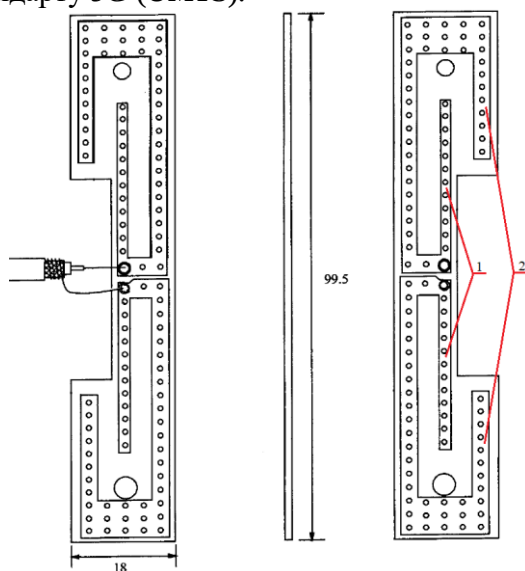


Рис. 15. Топология и внешний вид антенны-прототипа

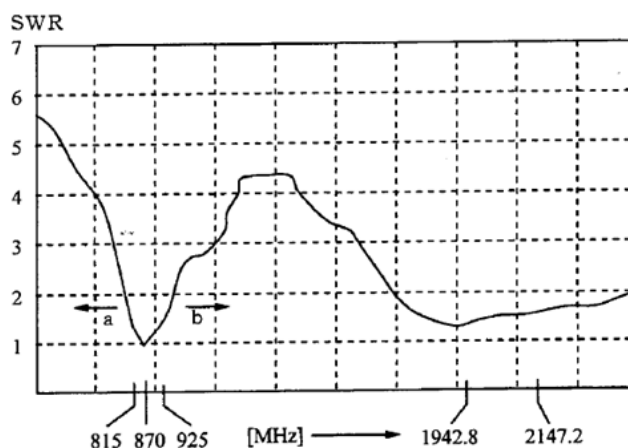


Рис. 16. График КСВ антенны-прототипа

График КСВ, представленный на рис. 16, свидетельствует о хорошем согласовании антенны с трактом 50 Ом в требуемых частотных полосах. КУ антенны не превышает 2 дБи (рис. 17). Как и у ранее рассмотренных антенн, ДН имеет форму «восьмерки» в вертикальной плоскости и круг – в горизонтальной (рис. 18).

Разработанная антенна имеет размеры пропорционально подобные прототипу. Выполненное численное моделирование с целью оптимизации конструкции под требуемые частотные диапазоны позволило изменить ДН и увеличить КУ.

На рис. 19 показана модель антенны, выполненная в программе «CST Studio Suite». Как и прототип, она представляет собой диэлектрическую плату (стеклотекстолит FR-4) с излучателями по обе ее стороны. Габариты данной антенны и прототипа представлены в табл. 2.

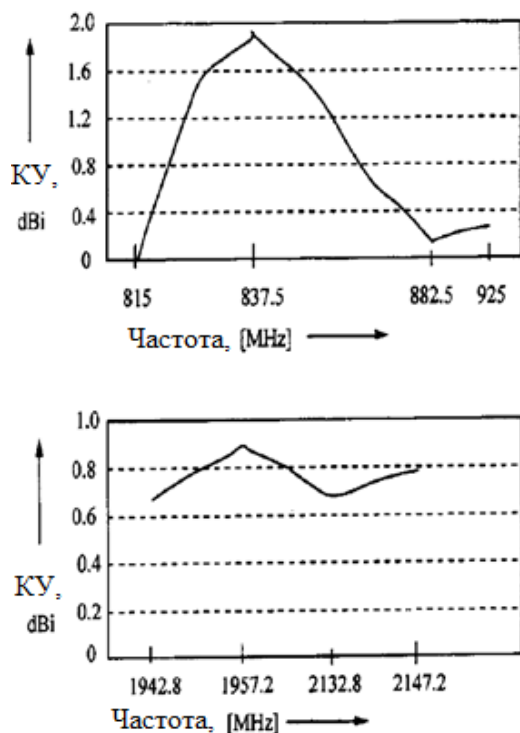


Рис. 17. КУ антенны-прототипа

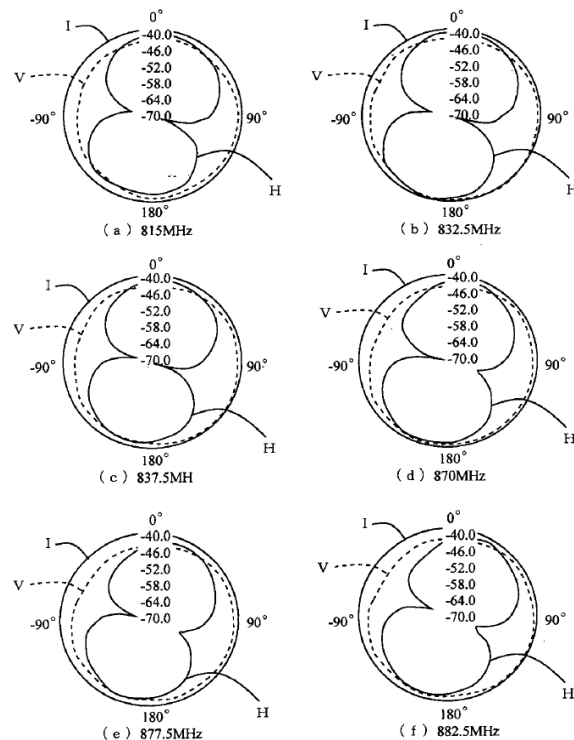


Рис. 18. ДН антенны-прототипа

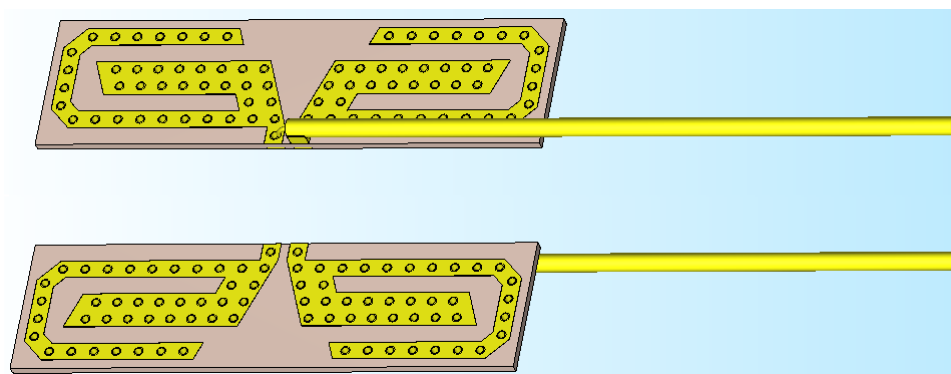


Рис. 19. Модель разработанной антенны

Таблица 2 – Основные размеры прототипа и разработанной антенны

Параметр	Разработанная антенна	Антенна прототип
Длина платы, мм	56	99,5
Ширина платы, мм	15	18
Высота платы, мм	1	1

Ключевые отличия разработанной антенны от прототипа обозначены на рис. 20. Смещение точки подключения коаксиального кабеля позволило изменить ДН в азимутальной плоскости, а увеличение угла между плечами диполей позволило добиться лучшего согласования в диапазоне 5,15 – 5,93 ГГц.

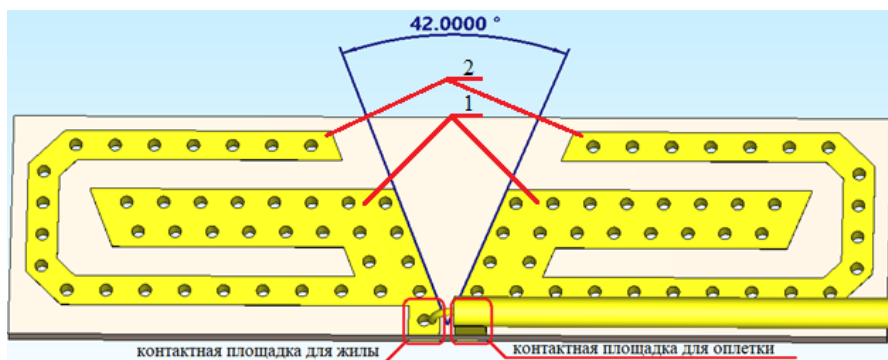


Рис. 20. Отличительные черты разработанной антенны от прототипа

Также отличием от прототипа является то, что повороты диполей (2) под 90 градусов были заменены на два поворота под углом 45 градусов. А углы наклона краёв диполей (1) и (2) равны углу раскрытия между их плечами. Это позволило снизить потери и улучшить согласование антенны. На рис. 21 представлена зависимость коэффициента отражения (S_{11}) от частоты разработанной антенны в диапазоне от 2 до 6 ГГц. Также на графике дополнительно приведены три расчета со значениями углов раскрытия между диполями 30, 50 и 0 градусов. Из графиков видно, что при значении угла раскрытия в 42 градуса достигается наилучшее согласование антенны.

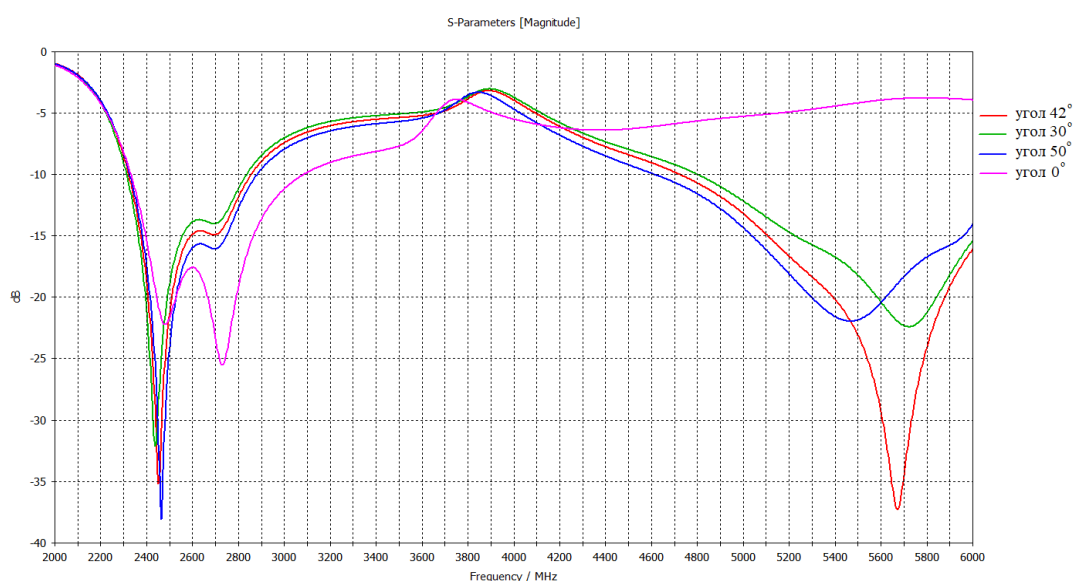


Рис. 21. График коэффициента отражения разработанной антенны

На рис. 22 и рис. 23 содержится график КУ в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно. На частотах 2,4 и 2,5 ГГц КУ не более 2 дБи, при этом ДН в азимутальной плоскости ненаправленная. Во втором диапазоне ДН имеет кардиоидную форму благодаря диполю (1), который служит рефлектором. Это позволяет добиться значений КУ в интервале 4,28 – 6,12 дБи, при этом ширина ДН по уровню минус 3 дБи варьируется в пределах от 199 до 224 градусов, что удовлетворяет требованию, предъявляемому к носимым мобильным устройствам.

Длина диполей была выбрана таким образом, чтобы кардиоидная форма ДН была сформирована на верхних частотах. Это связано с тем, что длины волн двух диапазонов отличаются более чем в 2 раза. Поэтому, для обеспечения равноудаленной связи, необходимо большее усиление в стандарте Wi-Fi 5 ГГц.

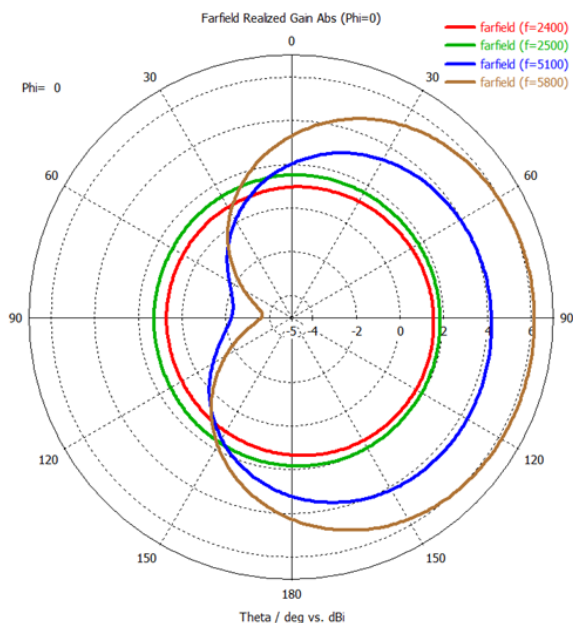


Рис. 22. КУ разработанной антенны в азимутальной плоскости

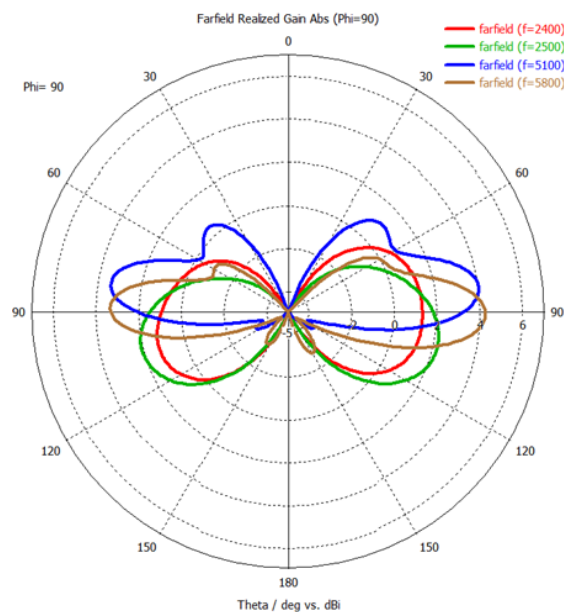


Рис. 23. КУ разработанной антенны в вертикальной плоскости

Заключение

Разработанная двухдиапазонная дипольная антенна для стандартов *Wi-Fi* 4 – 6 имеет тактико-технические характеристики и надёжностные показатели, позволяющие обеспечить требования по массогабаритным параметрам для эксплуатации в составе носимых мобильных приёмо-передающих устройств. Постановка разработанной антенны на серийное производство повысит эффективность существующих комплексов связи. Небольшие массогабаритные параметры позволяют использовать антенну на подвижных объектах различных классов, обеспечивая приём-передачу цифровых данных в широкополосном *Wi-Fi* канале с наземными, морскими или воздушными пунктами управления.

Литература

1. Патент на полезную модель № CN105490007A (Китай). Многопроводная антенна с высоким коэффициентом усиления для беспилотных летательных аппаратов // Хуан Вэй, Янь Хунфан, Хуан Янь, Чжоу Чжэньсин, Ван Кун, Сюй Чжичунь. Чаншу Хунбо Коммуникационные технологии, Лтд. – Опубликовано: 13.04.2016 г. – H01Q 1/36 (2006.01).
2. Патент на полезную модель № CN104795630A (Китай). Двухдиапазонная всенаправленная антенна WIFI // Тан Цзехун, Чэнь Чжун. TP-Link Коммуникационные технологии, Лтд. – Опубликовано: 22.07.2015 г. – H01Q 1/38 (2015.01).
3. Патент на полезную модель № CN106099354B (Китай). Двухчастотная встроенная антенна и способ ее устройства // Цинь Дунъюй, Цинь Сянхун, Лю Сяю, Фу Цян, Хоу И. ООО «Аксилспот Коммьюникейшн Ко». – Опубликовано: 07.04.2023 г. – H01Q 1/38 (2006.01).
4. Патент на полезную модель № EP2833475B1. Дипольная антенна // Шинг-Чан Лин, Лян-Сан Су. Компал Блопарт Нетворкс Инк. – Опубликовано: 04.05.2016 г. – H01Q 9/28 (2006.01).
5. Янушкевич Л. Анализ влияния затенения человеческого тела на беспроводные сенсорные сети, работающие в диапазоне 2,4 ГГц // Итальянская национальная конференция по датчикам. – Опубликовано 01.10.2018 г.
6. Патент на полезную модель № JP2011010017A (Япония). Блок дипольной антенны и его модуль. // Измори Номура, Цзяшэн Номура. Мидори Анзен Ко Лтд. – Опубликовано: 13.01.2011 г. – H01Q 1/38 (2006.01).

References

1. Utility Model Patent No. CN105490007A (China). Multi-wire antenna with high gain for unmanned aerial vehicles. Huang Wei, Yan Hongfang, Huang Yan, Zhou Zhenxing, Wang Kun, Xu Zhichun. Changshu Hongbo Communication Technology Co., Ltd. Published 13.04.2016. H01Q 1/36 (2006.01).
2. Utility Model Patent No. CN104795630A (China). Dual-band omnidirectional WIFI antenna. Tang Jiehong, Chen Zhong. TP-Link Communication Technologies, Ltd. Published 22.07.2015. H01Q 1/38 (2015.01).
3. Utility Model Patent No. CN106099354B (China). Dual-frequency built-in antenna and its device method. Qin Dongyu, Qin Xianghong, Liu Xiaoyu, Fu Qiang, Hou I. Accilspot Communication Co., Ltd. Published 07.04.2023. H01Q 1/38 (2006.01).
4. Utility Model Patent No. EP2833475B1. A dipole antenna. Shing-Chan Lin, Liang-San Su. Compal Leopard Networks Inc. Published 04.05.2016. H01Q 9/28 (2006.01).
5. Yanushkevich L. Analysis of the effect of human body shading on wireless sensor networks operating in the 2.4 GHz band. Italian National Sensor Conference. Published on 01.10.2018. (In Russian).
6. Utility Model Patent No. JP2011010017A (Japan). The dipole antenna unit and its module. Iemori Nomura, Jiasheng Nomura. Midori Anzen Co Ltd. Published: 13.01.2011 – H01Q 1/38 (2006.01).

Статья поступила 19 февраля 2025 г.

Информация об авторе

Шаповалов Фёдор Александрович – Инженер 2 категории. АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: синтез антенно-фидерных устройств. Тел.: +7(812)327-49-96 доб. 180. E-mail: shapovalovf99@yandex.ru. Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 7-я линия В.О., д. 80, к. 1, лит. А.

Development of a dipole antenna for 2,4 and 5 GHz bands

F. A. Shapovalov

Annotation. The paper presents a comparative analysis of dual-band miniature antennas designed to operate in the Wi-Fi 4-6 standards (IEEE802.11n, IEEE802.11ac, IEEE802.11ax). Based on the obtained characteristics, it turned out that the proposed developments have a number of disadvantages that reduce the effectiveness of their use as part of portable mobile access points. Since the functionality is growing every year and the weight and size parameters of the receiving and transmitting devices are decreasing, the task of creating new antennas that meet stricter criteria has become more urgent. **The aim** of the work is to develop an energy efficient and compact antenna located inside the body of a portable access point. It is necessary to provide no more than two voltage standing wave coefficients in two Wi-Fi frequency bands (2,4 – 2,48 GHz, 5,15 – 5,93 GHz), while the beam width of the radiation pattern in the azimuthal plane at a level of minus 3 dBi should be at least 190 degrees. **The results** of the work include the creation of a model of a dual-band dipole antenna, which is a dielectric substrate with identical radiators placed on its two sides, arranged symmetrically relative to the plane of the board and interconnected by through metallized holes. Each of the radiators consists of two electrically connected symmetrical vibrators of different configurations and lengths. As a result of design optimization in the CST Studio Suite program, it was possible to achieve SWR values of no more than 1,5 in the required ranges. At the same time, the DN at 2,4 GHz is omnidirectional in the horizontal plane, and in the second operating frequency band it has a cardioid shape with a beam width from 199 to 224 degrees. **Practical significance:** the developed antenna increases the range and quality of communication, with dimensions similar to competitors. This makes it possible to integrate it into existing devices, increasing their efficiency.

Keywords: dual-band antenna, dipole antenna, planar antenna, Wi-Fi, wearable mobile devices.

Information about Authors

Shapovalov Fedor Aleksandrovich – Engineer of the 2nd category of JSC “Research Institute “Neptune”. Tel.: +7(812)327-49-96 ext. 180. E-mail: shapovalovf99@yandex.ru. 199178, Russia, Saint-Petersburg, 7th line of Vasilyevsky Island, house 80, bild. 1, let. A.

Для цитирования: Шаповалов Ф. А. Разработка дипольной антенны для диапазонов 2,4 и 5 ГГц // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 2-11. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-2-11.

For citation: Shapovalov F. A. Development of a dipole antenna for 2,4 and 5 GHz bands. Means of Communication Equipment. 2025. No. 1 (169). pp. 2-11. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-2-11. (In Russian).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 004.75

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-12-32

Аналитическая модель процесса мониторинга технического состояния техники связи узла связи специального назначения

Сафиулов Д. М.

Аннотация. Современные телекоммуникационные системы специального назначения функционируют в условиях повышенных требований к надежности и оперативности. Это особенно актуально при выполнении задач управления войсками и оружием в ходе ведения современных операций. В статье рассмотрены существующие подходы к контролю технического состояния техники связи на узлах связи специального назначения и предложена аналитическая модель процесса ее мониторинга. Модель объединяет временные и надежность параметры (включая интенсивность отказов и восстановления, пропускную способность каналов, вероятности потерь пакетов), а также учитывает внешние воздействия (радиоэлектронное подавление) и ограниченные ресурсы. В работе проанализирована роль подсистемы мониторинга, которая не только способствует сокращению времени обнаружения и устранения отказов, но и позволяет оценить качество мониторинга с точки зрения функционирования системы, в интересах которой она применяется, то есть эффективности узла связи. **Цель исследования** – разработать формализованный подход, позволяющий учесть и оптимизировать ключевые параметры процесса мониторинга для повышения устойчивости и эффективности узла связи. **Научная новизна** заключается в том, что разработанная модель, в отличие от известных подходов моделирования мониторинга, учитывает эффективность принятия информационных решений. В известных моделях мониторинг предоставлял только сырые данные для анализа, тогда как в данной модели синтезируются временные и надежность критерии, что позволяет более точно оценить влияние информационных решений на эффективность функционирования метасистемы. **Результаты** подтверждают возможность применения предлагаемой аналитической модели для адаптации систем мониторинга в реальном времени, что в конечном итоге способствует увеличению боеготовности подразделений и оперативности управления. **Практическая значимость** работы состоит в том, что сформулированные модели и методики могут быть внедрены при проектировании и модернизации систем управления связью специального назначения, обеспечивая высокую степень готовности техники даже в условиях интенсивного противодействия.

Ключевые слова: аналитическая модель, время сбора информации, восстановление, достаточная статистика, коэффициент готовности, мониторинг технического состояния, оптимизация полноты, пропускная способность, радиоэлектронное подавление, телекоммуникационное оборудование, теория массового обслуживания, узел связи, устранение сбоев.

Введение

Построение систем мониторинга технического состояния техники связи на узлах связи специального назначения (СМУС) требует комплексного учета ограниченных ресурсов, вероятных деструктивных воздействий и структурных особенностей телекоммуникационных сетей. Повышение надежности и эффективности таких систем особенно важно при выполнении управленческих задач в ходе ведения современных операций. Исследования (например, [1-3]) указывают на значимость формализации всего процесса от сбора измерительной информации до анализа состояния объектов мониторинга (ОМ), но нередко ограничиваются оптимизацией отдельных параметров без должного учета стохастической природы пропускной способности каналов и ресурсных характеристик вычислительных устройств. Необходим подход, позволяющий учесть временные составляющие, включающие вероятностные и детерминированные параметры, и оптимизировать подзадачи маршрутизации, параллельной обработки данных и адаптивного управления сенсорной сетью.

Разработка формализованного подхода, позволяющего количественно оценивать качество подсистемы мониторинга техники связи на узле связи специального назначения (УС) и взаимосвязь временных и надежностных характеристик, является перспективной областью исследований. Такой подход дает возможность адаптировать политику опроса датчиков к текущим условиям, учитывать реальную пропускную способность каналов, оценивать полноту измерительной информации с точки зрения боевой готовности и эффективности функционирования УС, а также корректно распределять вычислительные ресурсы. Сочетание методов теории массового обслуживания, анализа отказоустойчивости и оптимизационных задач позволяет предложить аналитическую модель, которая помогает исследовать и определять рациональную конфигурацию подсистемы мониторинга для уменьшения задержек времени при обнаружении и устранении отказов (или чаще аномалий, сбоев), что влияет на повышение оперативной готовности техники связи.

Концептуальная модель сбора измерительной информации и постановка задачи на моделирование процесса мониторинга и восстановления

Под мониторингом технического состояния техники связи (ТС) в работе понимается непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров ОМ (образца ТС) в сравнении с заданными критериями, позволяющий своевременно выявлять сбои и аномалии в его функционировании, прогнозировать возможные отказы и принимать меры по их предупреждению [3-5].

СМ УС является подсистемой автоматизированной системы управления связью, она предназначена для диагностического контроля качества функционирования и ресурсного обеспечения ТС с заданной метрологической точностью и достоверностью [3, 6]. Основные этапы процесса мониторинга представлены на рис. 1.

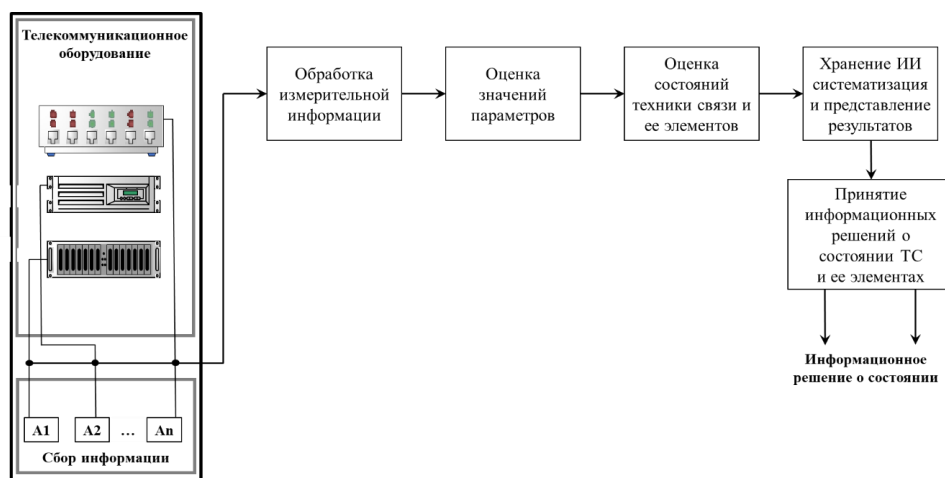


Рис. 1. Основные этапы процесса мониторинга техники связи

Под сбором измерительной информации (ИИ) в работе понимается целенаправленное извлечение систематизированной и несистематизированной информации о состоянии ТС УС для последующего ее анализа. В общем случае на составляющие качества СМ УС влияют множество взаимоувязанных факторов, которые следуют учитывать при организации процессов измерений параметров (характеристик) элементов ТС.

Формально целевую функцию, которая раскрывает зависимость факторов, влияющих на оперативность сбора ИИ, и стремится к минимуму временных затрат, можно представить выражением:

$$T_{сб} = f(V_{ИИ}, Q_{КСОДМ}, K_{ПДЛ}, Q_{СИ}, Q_{РИ}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $T_{сб}$ – время сбора ИИ, $V_{ИИ}$ – объем передаваемой ИИ; $Q_{КСОДМ}$ – качество каналов сети обмена данными мониторинга (СОДМ); $K_{ПДЛ}$ – коэффициент подготовленности

должностных лиц органов управления связью; $Q_{\text{си}}$ – качество средств измерений; $Q_{\text{ри}}$ – качество результатов измерений; Θ – допущения и ограничения.

Учитывая характер функционирования УС, при формировании СМ УС целесообразно рассматривать ее как иерархически сложную систему, состоящую из четырех уровней управления ТС, рис. 2:

- I уровень – мониторинг отдельного юнита (элемента) ТС (например, полуккомплекта радиорелейной станции МИК-РЛ 4-18Р);
- II уровень – мониторинг аппаратной (станции) связи (например, радиорелейная станция (антенный модуль) Р-431АМ);
- III уровень – мониторинг элемента УС (например, центра каналообразования);
- IV уровень – мониторинг УС в целом.

Это подчеркивает актуальность задачи автоматизации мониторинга и необходимости «дозирования» полноты диагностической информации с учетом многоуровневой структуры УС.

Как видно на рис. 2, иерархический характер системы управления (от операторов отдельных элементов до оператора УС в целом) требует, чтобы каждый оператор получал именно ту степень детализации собираемой ИИ (U), которая ему необходима для оперативного принятия решения и, соответственно, эффективного управления эксплуатируемой ТС. Недостаток данных (U) о состоянии ТС может повлечь за собой неверные или упущенные управленческие решения, а их избыток – увеличить время на анализ и замедлить реакцию на предотказное состояние. Соответствующие аспекты оптимизации обмена информацией и структурирования данных, учитывающих разные уровни управления, были рассмотрены в [6, 7].

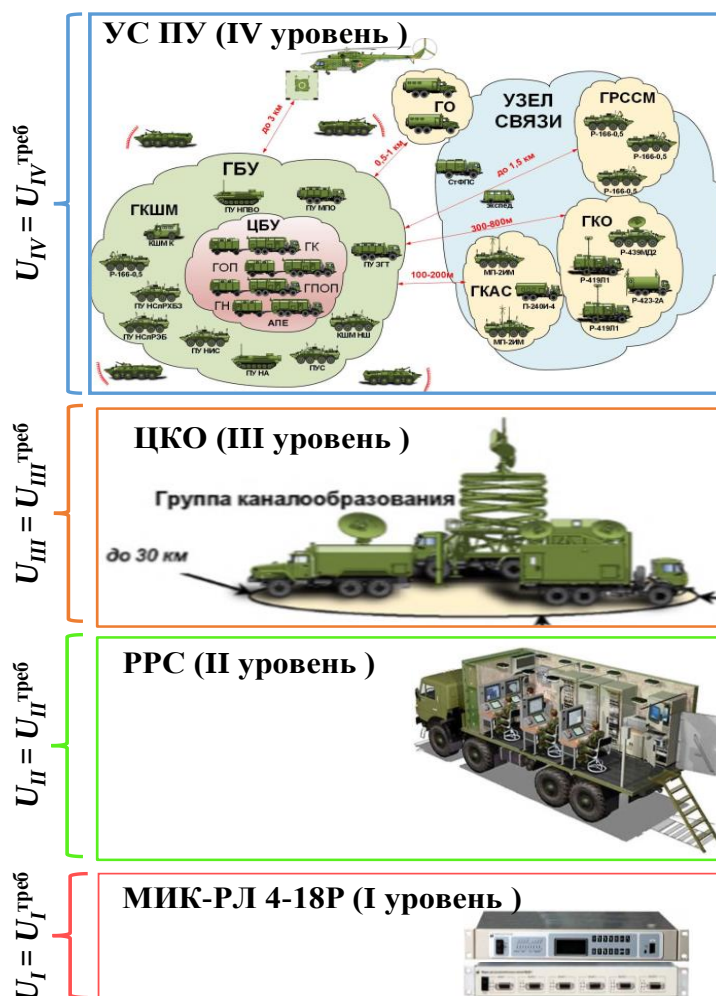


Рис. 2. Иерархическая структура управления состоянием техники связи УС

Большинство современных активных систем мониторинга используют одинаковый принцип: система мониторинга неким образом опрашивает элементы ТС или программное обеспечение, получает результат и сравнивает его либо с шаблоном, либо с заранее заданными предельно допустимыми значениями. Объем и своевременность получаемой информации определяет качество принимаемых решений по управлению состоянием эксплуатируемых объектов.

Мониторинг технического состояния ТС является сложным многомерным процессом, в котором необходимо учитывать большое число взаимосвязанных факторов. При анализе реальных объектов для моделирования этого процесса требуется значительное количество временных и материальных ресурсов.

Разработка аналитической модели процесса мониторинга технического состояния ТС УС необходима для исследования процесса и анализа его характеристик. Модель должна учитывать взаимодействие различных подсистем, таких как сбор информации, ее обработка, анализ состояния ОМ и влияние внешних факторов, а также ограничений по ресурсам в условиях ведения операции. Задача моделирования заключается в построении модели, которая описывает взаимосвязь между параметрами мониторинга, состоянием ТС и внешними воздействиями, а также вычисляет временные характеристики и коэффициент готовности наблюдаемой системы. Полученные результаты должны позволить оценить качество СМ УС, исследуя ее вклад в эффективность функционирования УС, как метасистемы.

Основные этапы разработки модели включают [8]:

- определение набора параметров, которые влияют на процесс сбора ИИ, таких как объем передаваемых данных, качество каналов связи и средства измерений;
- учет воздействия внешних факторов, таких как радиоэлектронное подавление (РЭП) и вероятность потери пакетов в условиях помех и других деструктивных воздействий;
- построение аналитических выражений для временных характеристик сбора, обработки и анализа данных, а также расчета времени восстановления системы после сбоев, аномалий и отказов.

С учетом изложенного, для реализации модели процесса мониторинга технического состояния ТС УС необходимы следующие исходные данные, представленные в табл. 1.

При разработке модели процесса мониторинга технического состояния ТС с учетом целей моделирования приняты следующие ограничения и допущения:

1) $Z \subseteq Z_{\text{доп}}$, $Y \subseteq Y_{\text{доп}}$, $R \subseteq R_{\text{доп}}$ – все параметры (табл. 1) находятся в допустимых пределах, определяемых техническими нормами, регламентами и условиями боевого применения.

2) Процессы отказов и восстановлений ОМ подчиняются марковским моделям.

3) Достоверность ИИ обеспечена на требуемом уровне за счет применения соответствующих протоколов и технических средств.

4) Внешние воздействия (огневые, РЭП, информационные) задаются через интенсивности, влияющие на эффективность каналов и вероятностные характеристики отказов и потерь данных [9].

5) Модель не учитывает различия в сценариях и степени сложности устранения отказа; величина времени устранения ($T_{\text{устр}}$) определяется исходя из времени диагностирования ($T_{\text{диагн}}$) и базового времени (β), соответствующего оптимальным условиям проведения восстановительных процедур.

6) Предполагается рациональное (оптимальное) управление ресурсами техники связи, а принимаемые решения о состоянии элементов основываются на данных, предоставляемых СМ УС.

7) Под термином «отказ» понимается любое нарушение штатного функционирования наблюдаемых элементов ТС, в том числе сбои или аномалии.

Таблица 1 – Исходные данные модели процесса мониторинга техники связи УС

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение
1.	Множество объектов мониторинга (A)	$A = \{a_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$, где a_i – элемент характеризующийся показателями надежности (интенсивность отказов, время восстановления) и влияющий на коэффициент готовности наблюдаемой системы ($K_{г,сис\tau}$) на УС
2.	Множество параметров процесса мониторинга (Z)	$- U = (V_{получ} / V_{тр})$ – полнота собираемой ИИ (где $V_{получ}$ – объем полученной информации о параметрах, $V_{тр}$ – объем требуемой ИИ для определения технического состояния ОМ; $U = 1$ – полная, $U < 1$ – недостаточная, $U > 1$ – избыточная); $- K_{скр}$ – коэффициент скрытности, отражающий эффективность мер по защите ИИ от утечек, компрометации и искажения; $- P_{потери}$ – вероятность потерь пакетов, определяющая степень деградации качества канала в условиях помех. Дополнительно в Z входят временные параметры процесса мониторинга – время сбора ИИ ($T_{сб}$) и время ее обработки ($T_{обр}$), зависящие от архитектуры СМ.
3.	Множество воздействий противника (Y) в условиях ведения операции	$- \gamma_{огн}$ – доля пропускной способности каналов связи, теряемая под огневым воздействием противника; $- \gamma_{р\pi}$ – доля пропускной способности каналов связи, теряемая под воздействием РЭП противника, при этом $0 \leq (\gamma_{огн}, \gamma_{р\pi}) \leq 1$.
4.	Множество ограничений по ресурсам (R) в условиях ведения операции	$- R_{ср\text{вм}}$ – ресурсы серверов мониторинга (вычислительная мощность, число серверов) для параллельной обработки данных. $- R_{кан}$ – пропускная способность каналов связи, определяющая скорость передачи ИИ и влияющая на $T_{сб}$. $- R_{прот}$ – ресурсы протоколов передачи данных, определяющие эффективность маршрутизации, шифрования, коррекции ошибок. $- L_{ср}$ – средняя (физическая и логическая) длина пути передачи данных (сложность топологии), влияющая на задержки передачи и перераспределение нагрузки.

Таким образом, на основе указанных исходных данных модель процесса мониторинга технического состояния ТС УС должна рассчитывать соответствующие выходные данные (табл. 2).

Таблица 2 – Выходные данные модели процесса мониторинга ТС УС

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение
1.	Временные показатели, характеризующие процедуры сбора и обработки ИИ, а также обнаружения и устранения отказов	$T_{сб}, T_{обр}, T_{обн}, T_{устр}$
2.	Коэффициент готовности наблюдаемой системы, определяемый совокупной надежностью и возможностями восстановления наблюдаемых элементов	$K_{г,сис\tau}$
3.	Вероятность своевременной доставки сообщений УС заданного типа (k), рассчитанная на основе временных характеристик, готовности системы и установленных предельных временных параметров доставки ($T_{тр,k}$)	$P_{св,k}$

Следовательно, целью моделирования выступает определение зависимости времени восстановления после отказа ($T_{восст}$) и коэффициента готовности наблюдаемой системы ($K_{г,сис\tau}$), определяющих эффективность функционирования УС, которая выражается через вероятность своевременной доставки сообщений на УС ($P_{св,k}$) от параметров мониторинга (Z , Y , R) и состояния наблюдаемых объектов A .

С формальной точки зрения задача сводится к созданию аналитической модели (η) процесса мониторинга технического состояния техники связи УС, которая позволит определить зависимость вероятности своевременной доставки сообщений на УС ($P_{св,k}$) от параметров мониторинга ($T_{сб}$, U , $T_{обр}$, $K_{скр}$), учитывая влияния архитектуры системы мониторинга на время сбора информации ($T_{сб}$), а также воздействия противника (Y) и ограничений по ресурсам (R) в условиях ведения операции:

$$\eta: \langle A, Z, Y, R \rangle \rightarrow \langle T_{\text{восст}}, K_{\text{г.сист}} \rangle \rightarrow P_{\text{св},k} \mid Z \subseteq Z_{\text{доп}}, Y \subseteq Y_{\text{доп}}, R \subseteq R_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{восст}}$ и $K_{\text{г.сист}}$ тесно связаны с оперативной готовностью техники связи и, соответственно, определяют общий уровень эффективности функционирования УС.

Определение временных характеристик процесса мониторинга технического состояния техники связи УС

Разработка аналитической модели процесса мониторинга технического состояния ТС УС предполагает поэтапное определение ключевых временных характеристик, влияющих на эффективность функционирования наблюдаемой системы. К таким характеристикам относятся:

- время сбора измерительной информации $T_{\text{сб}}$;
- время обработки измерительной информации $T_{\text{обр}}$;
- время обнаружения отказа или аномалии $T_{\text{обн}}$.

Последовательное и обоснованное определение этих параметров позволит в дальнейшем вывести аналитические выражения для времени восстановления $T_{\text{восст}}$, коэффициента готовности наблюдаемой системы $K_{\text{г.сист}}$ и вероятности своевременной доставки сообщений $P_{\text{св},k}$ на УС.

В рамках данного исследования целесообразно использовать принципы системного анализа, положения теории массового обслуживания, теории надежности, а также теории графов, применительно к сетям связи. Для учета влияния архитектуры и вариантов параллельной обработки данных можно использовать методы оптимизации параметров сетевых ресурсов. Такой подход позволит разработать математически корректную, гибкую и адаптируемую к различным условиям модель.

Процесс мониторинга технического состояния ТС УС в условиях противодействия и ограниченных ресурсов предполагает:

- сбор ИИ от множества наблюдаемых элементов $A = \{a_i\}$, каждый из которых генерирует определенный объем данных, необходимых для диагностики их технического состояния;
- передачу ИИ по каналам сети обмена данными мониторинга (СОДМ) к серверам мониторинга (СрвМ), обладающим вычислительными ресурсами для ее последующей обработки;
- наличие воздействий противника (радиоэлектронное подавление, информационное воздействие), снижающих эффективную пропускную способность каналов и повышающих вероятность потерь пакетов;
- параллельную обработку измерительной информации, что сокращает общую задержку в процессе мониторинга.

На данном этапе целесообразно определить формальную модель времени сбора $T_{\text{сб}}$ и времени обработки $T_{\text{обр}}$, а затем выразить на их основе время обнаружения отказа:

$$T_{\text{обн}} = T_{\text{сб}} + T_{\text{обр}}. \quad (3)$$

Последующим шагом является определение времени устранения отказа $T_{\text{устр}}$ и, в итоге, времени полного восстановления наблюдаемой системы:

$$T_{\text{восст}} = T_{\text{обн}} + T_{\text{устр}}. \quad (4)$$

При этом стоит предусмотреть оптимизационную задачу, связанную с выбором объема собираемой ИИ U , опираясь на теорию достаточной статистики, чтобы обеспечить минимизацию временных затрат при достаточной полноте данных для точной диагностики. Кроме того, следует учесть рациональный состава сенсорной сети (выбор набора датчиков), обеспечивающих требуемую полноту, а также адаптивную стратегию изменения частоты их опроса. Такой комплексный подход позволит учесть структурные и организационные аспекты сенсорной сети, повышая эффективность процесса мониторинга и восстановления.

Ключевым фактором, определяющим время сбора измерительной информации $T_{\text{сб}}$ является совокупный объем данных V_{Σ} , подлежащих сбору за интервал наблюдения.

Он формируется из параметров технического состояния N наблюдаемых элементов, каждый из которых характеризуется собственным набором измеряемых параметров. Если для каждого i -го ОМ собирается U_i параметров, а средний объем данных на параметр равен $V_{\text{ед}}$ бит, то

$$V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N U_i V_{\text{ед}}. \quad (5)$$

Для упрощения анализа можно ввести интегральный показатель полноты:

$$U = \sum_{i=1}^N U_i, \quad (6)$$

тогда

$$V_{\Sigma} = U \cdot V_{\text{ед}}. \quad (7)$$

В ходе современных операций каналы связи работают в условиях дефицита пропускной способности, а интенсивное противодействие противника серьезно затрудняет их стабильное функционирование. Под воздействием радиоэлектронного подавления (характеризуемого интенсивностью $\gamma_{\text{рэп}}$) и при росте вероятности потерь пакетов $P_{\text{потери}}$ пропускная способность каналов существенно снижается. Для учета этих факторов целесообразно ввести показатель эффективной пропускной способности $R_{\text{эфф}}$, который отражает реальную способность канала передавать данные, учитывая как потери, так и воздействие внешних факторов, таких как радиоэлектронное подавление.

Эффективная пропускная способность может быть выражена следующим образом:

$$R_{\text{эфф}} = R_{\text{кан}} (1 - \gamma_{\text{рэп}}) (1 - P_{\text{потери}}), \quad (8)$$

где $R_{\text{кан}}$ – номинальная пропускная способность канала СОДМ.

Как отмечается в [6, 7], необходимость оперативного предоставления услуг связи органам военного управления часто приводит к несбалансированным настройкам протоколов маршрутизации, параметров QoS (набор технологических решений *Quality of Service*) и других сервисных механизмов, а экстремальные климатические факторы и нестабильное энергоснабжение от полевых генераторов провоцируют систематические аномалии, сбои и отказы телекоммуникационного оборудования (ТКО). Особенно это чувствительно для средств связи критичной номенклатуры, качество функционирования которых напрямую влияет на выполнение оперативных задач управления войсками и оружием [3, 5].

Вероятность потери пакетов $P_{\text{потери}}$ ($0 \leq P_{\text{потери}} \leq 1$) определяется совокупностью факторов, включая качество энергоснабжения и технического обслуживания. При этом $(1 - P_{\text{потери}})$ отражает долю успешно переданных и принятых сообщений и существенно влияет на итоговую эффективность наблюдаемой системы.

Как было указано выше, $\gamma_{\text{рэп}}$ и $P_{\text{потери}}$ приняты за безразмерные коэффициенты, отражающие долю пропускной способности, теряемой при радиоэлектронном подавлении и потерях пакетов. Это позволяет напрямую использовать их в выражении (8), не прибегая к дополнительным преобразованиям размерностей [10, 11], и тем самым корректно оценивать эффективность СОДМ в условиях внешних воздействий.

В СОДМ, состоящей из нескольких маршрутов, необходимо учитывать различия в приоритетности маршрутов или типов данных. Для этого можно ввести весовые коэффициенты w_L и w_V , позволяющие комплексно отразить влияние протяженности маршрута L_{ij} (например, в километрах или числе хопов) и объема данных V_{ij} (например, в битах). Как показано в исследованиях по теории сетей, анализу надежности и расчету нагрузки в телекоммуникационных системах [12–14], такие весовые коэффициенты дают возможность привести эти разнородные величины к общей «стоимости» в битах (или иной удобной единице), обеспечивая согласованность размерностей и корректное сложение параметров в целевой функции.

В частности, w_L может иметь размерность «бит/хоп» и отражать дополнительный объем служебной или контрольной информации, необходимой на каждый хоп, тогда как w_V часто берется безразмерным (или равным 1), если V_{ij} уже выражено непосредственно в битах.

При этом $(w_L L_{ij} + w_V V_{ij})$ будет иметь итоговую размерность «бит», что необходимо для корректного деления на пропускную способность канала, выраженную в «бит/с». Подобный подход встречается в большинстве моделей оптимизации маршрутизации телекоммуникационных сетей и обеспечивает возможность формулировать единую целевую функцию, согласованную с реальными показателями работы сети.

Для формализации задачи минимизации суммарного времени передачи данных (или его эквивалентной «стоимости») вводятся 0–1-переменные $X_{ij} \in \{0, 1\}$ которые определяют, будет ли выбран маршрут j для передачи потока данных i . Целевая функция может быть записана в виде:

$$\min_{X_{ij}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{w_L L_{ij} + w_V V_{ij}}{R_{\text{кан},ij} (1 - \gamma_{\text{рэп}}) (1 - P_{\text{потери}})} X_{ij}, \quad (9)$$

где $R_{\text{кан},ij}$ – номинальная пропускная способность канала для маршрута j потока i , $\gamma_{\text{рэп}}$ – коэффициент (интенсивность) радиоэлектронного подавления, $P_{\text{потери}}$ – коэффициент (вероятность) потерь пакетов.

Для обеспечения физической реализуемости решения и исключения «нулевого» назначения всех X_{ij} , можно ввести дополнительные ограничения:

1) Назначение каждого потока:

$$\sum_{j=1}^M X_{ij} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}.$$

Это условие означает, что каждый поток данных i должен быть передан хотя бы по одному (или ровно по одному) маршруту. Тем самым вариант $X_{ij} = 0$ для всех i, j исключается как неудовлетворяющий требованию доставки сообщения.

2) Ограничения на пропускную способность (при необходимости, если модель учитывает несколько потоков, передаваемых параллельно):

$$\sum_{i=1}^N D_i X_{ij} \leq C_j, \forall j \in \{1, 2, \dots, M\},$$

где D_i – исходный объем данных потока i (без учета L_{ij}), а C_j – максимальная нагрузка (или ограничение по пропускной способности) для маршрута j . Эти условия предотвращают перегрузку конкретного маршрута.

3) Домен переменных:

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j.$$

Указанные ограничения делают задачу корректной и исключают нежелательное решение с «нулевыми» X_{ij} . При таком описании задача является конечной (переменных всего $N \times M$), но относится к классу целочисленного линейного программирования, что указывает на ее потенциальную NP -трудность. Тем не менее, в практических задачах с разумными размерами сети она решается стандартными методами (например, ветвления и границ, жадными и эвристическими алгоритмами и т. п.).

В непрерывной постановке (когда переменные X_{ij} допускают любые значения от 0 до 1) рассматриваемая задача была бы линейной и выпуклой. Однако из-за целочисленных ограничений ($X_{ij} \in \{0, 1\}$) классическая выпуклость теряется, хотя структура задачи остается линейной. В сетевых моделях это стандартная ситуация: конечное число переменных и линейность целевой функции и ограничений обеспечивают вычислительную разрешимость средствами целочисленного линейного программирования (ILP). Параметры w_L , w_V , $\gamma_{\text{рэп}}$ и $P_{\text{потери}}$ могут задаваться экспериментально или определяться статистически. При их существенном изменении (например, увеличении $\gamma_{\text{рэп}}$) задачу решают повторно для адаптации конфигурации сети. Таким образом, хотя постановка не является выпуклой в строгом смысле, ее конечная область допустимых решений и линейная структура позволяют использовать стандартные ILP -алгоритмы.

Оптимальное решение $\{X_{ij}^*\}$ отражает такое распределение маршрутов, при котором суммарное время передачи данных (или эквивалентная «стоимость») минимально. На практике возможно единоразовое решение задачи при проектировании или модернизации сети; периодическая переоптимизация при изменении условий эксплуатации (например, появлении новых маршрутов или росте уровня помех); а также динамическая адаптация (онлайн-алгоритмы), необходимая для оперативной перестройки маршрутов при перегрузках или отказах каналов. Благодаря этому модель не ограничивается единичным («жестким») вариантом архитектуры, она может использоваться как на этапе разработки, так и при эксплуатации системы, когда необходимо адаптировать сеть к меняющимся ресурсным и топологическим условиям.

В результате решения задачи (9) с введенными выше ограничениями определяется конфигурация маршрутов $\{X_{ij}^*\}$, при которой суммарное время передачи минимально, и, следовательно, мы можем обозначить найденное оптимальное время сбора ИИ как $T_{сб}^*$. Зная объем данных V_Σ и учитывая, что:

$$T_{сб}^* = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{w_L L_{ij} + w_V V_{ij}}{R_{кан,ij} (1 - \gamma_{РЭП}) (1 - P_{потери})} \cdot X_{ij}^*, \quad (10)$$

можно перейти к определению эффективной пропускной способности системы $R_{эфф,сист}$ и далее связать ее с временными характеристиками мониторинга (например, $T_{обр}$, $T_{обн}$, $T_{восст}$).

При ограничениях на топологию и ресурсы, решение такой задачи дает эквивалентную эффективную пропускную способность системы $R_{эфф,сист}$:

$$T_{сб} = \frac{V_\Sigma}{R_{эфф,сист}}. \quad (11)$$

Использование такого подхода позволяет учитывать противодействие, ресурсные ограничения и архитектуру сети передачи данных в виде оптимизационной задачи, решаемой стандартными методами линейного или целочисленного программирования. Это создает основу для дальнейшей интеграции с оценкой времени обработки, обнаружения и устранения отказов.

Время обработки измерительной информации $T_{обр}$ напрямую зависит от вычислительных ресурсов системы мониторинга, которые можно представить в виде интегрального показателя $R_{СрвМ}$, отражающего суммарную производительность серверов. В упрощенном виде данная зависимость может быть записана следующим образом:

$$T_{обр} = \frac{U \cdot V_{ед}}{R_{эфф,сист}}. \quad (12)$$

Реальные условия применения УС [15] предполагают необходимость учитывать ограниченную степень параллельной обработки данных, а также загрузку и распределение нагрузки между несколькими серверами, поэтому целесообразно ввести коэффициент загрузки $k_{загр}$ и число параллельно обрабатываемых потоков $N_{паралл}$:

$$T_{обр} = \frac{U \cdot V_{ед}}{R_{СрвМ} \cdot \frac{N_{паралл}}{k_{загр}}}. \quad (13)$$

В ходе проектирования системы мониторинга можно применить методы оптимизации распределения обработки данных по серверам, используя линейное или целочисленное программирование [16]. Это позволит минимизировать $T_{обр}$ при заданных ресурсных ограничениях.

В процессе мониторинга технического состояния ТС УС, временные характеристики, такие как время сбора информации ($T_{сб}$), время обработки ($T_{обр}$) и время обнаружения отказа ($T_{обн}$), играют ключевую роль в оценке эффективности функционирования системы [17]. Каждое из этих значений имеет свои особенности и должно быть тщательно рассчитано, так как они

определяют, насколько оперативно система реагирует на возникающие сбои или аномальных событий. Эти временные характеристики зависят не только от архитектуры сети и используемых технологий, но и от внешних воздействий, типа радиоэлектронного подавления, потерь пакетов, нестабильности энергоснабжения и др.

Ключевым элементом в этом процессе является правильное определение времени обнаружения отказа $T_{\text{обн}}$, которое включает в себя как время сбора ИИ, так и время ее обработки. Таким образом, время обнаружения отказа можно выразить как сумму двух временных характеристик: времени сбора и времени обработки ИИ, что позволит затем перейти к более детальному оцениванию времени восстановления наблюдаемой системы, с учетом всех факторов, влияющих на ее работоспособность. Далее будет рассмотрен процесс оптимизации данных, включая минимизацию временных затрат и адаптацию системы к условиям реального времени, что позволит исследовать стабильность работы сети в условиях повышенных нагрузок и внешних помех.

Обнаружение отказа основывается на своевременном получении и обработке ИИ, поэтому справедливо выражение (3).

После решения оптимизационной задачи маршрутизации для X_{ij}^* и получения одного эффективного канала с эффективной пропускной способностью $R_{\text{эфф,сист}}$, рассчитанной с учетом $\gamma_{\text{РЭП}}$ и $P_{\text{потери}}$, время обнаружения отказа, исходя из выражений (11) и (13) можно представить выражением:

$$T_{\text{обн}} = \frac{V_{\Sigma}}{R_{\text{эфф,сист}}} + \frac{U \cdot V_{\text{ед}}}{R_{\text{СрвМ}} \cdot \frac{N_{\text{паралл}}}{k_{\text{загр}}}}. \quad (14)$$

Таким образом, полученная модель позволяет представить время обнаружения отказа $T_{\text{обн}}$ как функцию ключевых параметров СМ (U , $\gamma_{\text{РЭП}}$, $P_{\text{потери}}$, $R_{\text{кан}}$, $R_{\text{СрвМ}}$, $N_{\text{паралл}}$, $k_{\text{загр}}$) и результатов оптимизационных задач по распределению трафика и обработке ИИ. Применение описанных методов (решение оптимизационной задачи по маршрутам, оптимизация состава сенсорной сети, адаптивная стратегия опроса, настройка вычислительных ресурсов) обеспечивает адаптацию модели к конкретным условиям эксплуатации и позволяет минимизировать $T_{\text{обн}}$. Это создает фундамент для дальнейшего анализа и оптимизации времени устранения отказов ($T_{\text{устр}}$) и, в конечном итоге, времени полного восстановления наблюдаемой системы ($T_{\text{восст}}$).

В табл. 3 приведены исходные данные для демонстрационного примера расчета времени обнаружения отказа $T_{\text{обн}}$.

Таблица 3 – Исходные данные для примера расчета времени обнаружения отказа

№ п/п	Обозначение	Описание	Единица измерения	Значение
1.	N	Число наблюдаемых элементов А	ед.	3
2.	U_i	Число параметров для i -го элемента	ед.	$U_1 = 50$; $U_2 = 60$; $U_3 = 70$.
3.	$V_{\text{ед}}$	Средний объем данных на параметр	бит	2×10^5
4.	$R_{\text{кан}}$	Номинальная пропускная способность канала	бит/с	2×10^6
5.	$\gamma_{\text{РЭП}}$	Интенсивность РЭП	–	0,25
6.	$P_{\text{потери}}$	Вероятность потери пакетов	–	0,1
7.	$R_{\text{СрвМ}}$	Эффективная вычислительная мощность серверов мониторинга	бит/с	5×10^6
8.	$N_{\text{паралл}}$	Число параллельно обрабатываемых потоков	ед.	5
9.	$k_{\text{загр}}$	Коэффициент загрузки	–	2,0
10.	w_L и w_V	Весовые коэффициенты маршрутов (длина и объем)	–	$w_L = 1,0$ $w_V = 1,0$

В данном примере учтены типовые значения числа наблюдаемых элементов, объема данных на параметр, пропускной способности канала, интенсивности РЭП и вероятности потери пакетов. Предполагается, что необходимые оптимизационные задачи выбора маршрутов и распределения вычислительных ресурсов уже решены, и известна эффективная пропускная способность $R_{\text{эфф.сист.}}$. Результаты расчетов показывают, что время сбора информации $T_{\text{сб}}$ при заданных параметрах составляет около 26,7 с, а время обработки $T_{\text{обр}}$ достигает 2,9 с, в результате чего суммарное время обнаружения отказа $T_{\text{обн}}$ определяется равным около 30 с. На основе приведенных в таблице данных можно проанализировать влияние объема собираемой информации, уровня противодействия и вычислительных ресурсов на $T_{\text{обн}}$, а также построить соответствующие графики (рис. 3, 4, 5) для более наглядной оценки ключевых факторов и выявления оптимальных настроек системы мониторинга.

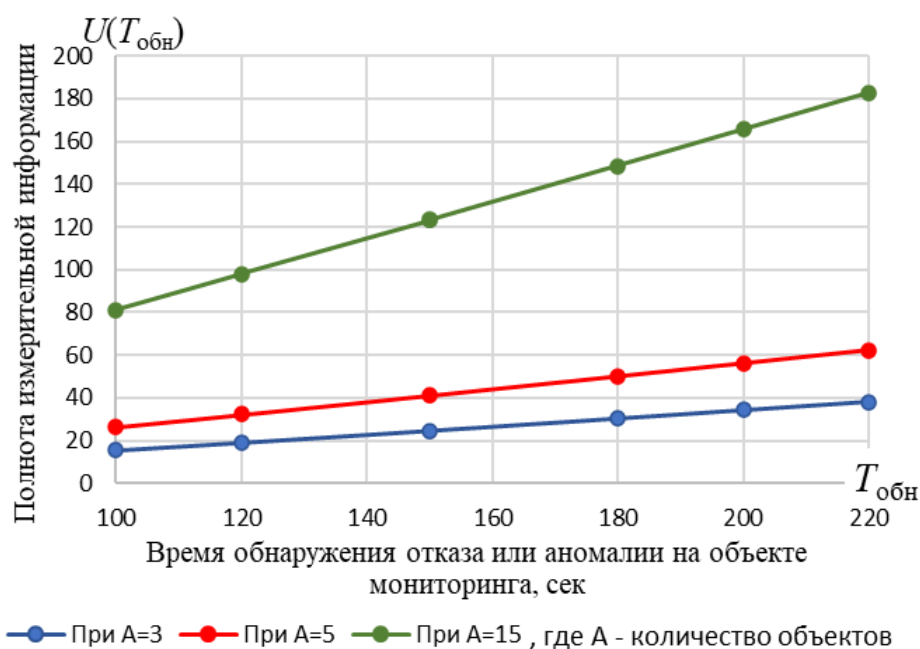


Рис. 3. Зависимость времени обнаружения отказа или аномалии в объекте мониторинга ($T_{\text{обн}}$) от полноты измерительной информации (U)

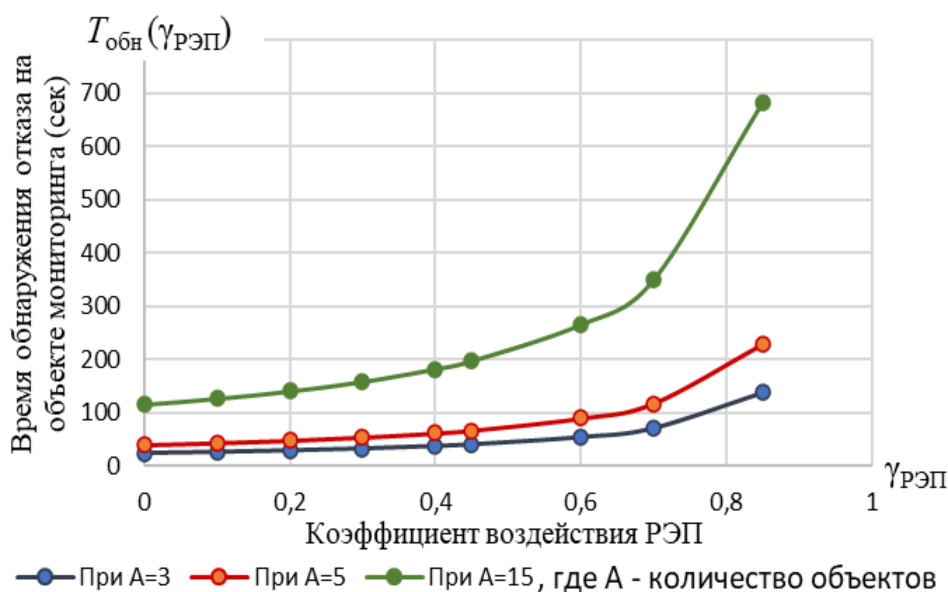


Рис. 4. Зависимость времени обнаружения отказа или аномалии в объекте мониторинга ($T_{\text{обн}}$) от воздействия применения РЭП противником ($\gamma_{\text{РЭП}}$)

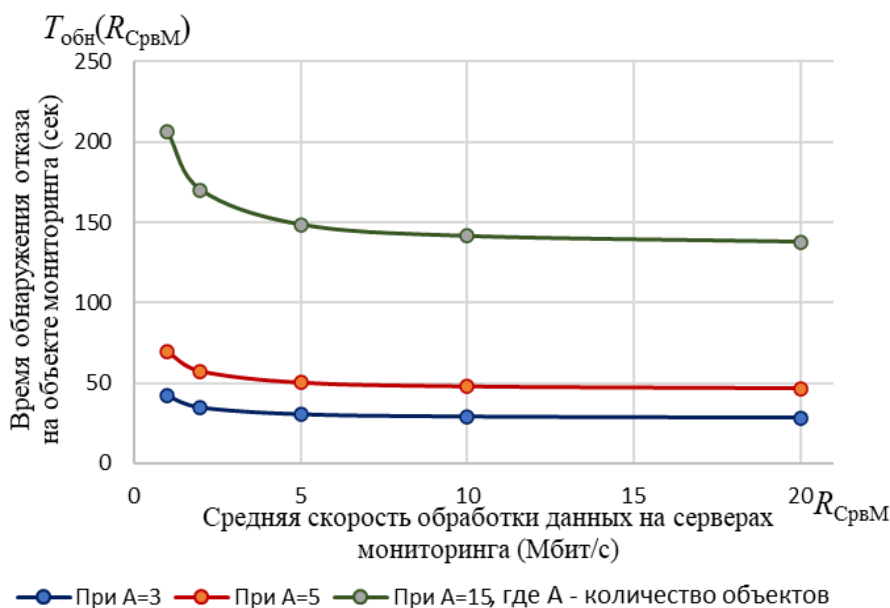


Рис. 5. Зависимость времени обнаружения отказа в объекте мониторинга ($T_{обн}$) от вычислительных ресурсов серверов мониторинга

Моделирование процесса устранения отказов с учетом формирования сенсорной сети и адаптивного управления частотой опроса. Расчет времени восстановления

Базовая модель мониторинга и обнаружения отказов не учитывает влияние структуры сенсорной сети, поэтому реальное время устранения $T_{устр}$ и полное время восстановления $T_{восст}$ заметно зависят от рационального размещения датчиков и иерархического уровня пользователей. В условиях эксплуатации УС требуется учитывать различные классы информационных требований (например, начальника радиорелейной станции или центра каналообразования), задающие набор и глубину собираемых данных. Полнота U и безопасность $K_{скр}$ информации непосредственно влияют на длительность восстановительных процедур, так как недостаточный объем данных ИИ приводит к неточной диагностике, а их избыточность вызывает дополнительные задержки при обработке. Для оптимизации этих параметров используют принципы теории массового обслуживания и теории надежности, позволяющие формализовать структуру и характеристики системы, а также приемы теории достаточной статистики. Последние дают возможность определить минимально достаточный объем данных ИИ U_{min} для корректного решения диагностических задач. При этом временные затраты на диагностику описываются зависимостью:

$$\Delta T_{диагн} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \frac{U_{min}}{U}}, \quad (15)$$

где: U_{min} — минимально достаточный объем данных ИИ для диагностики; α — коэффициент, характеризующий степень влияния избыточной информации на время диагностики. Его значение определяется либо экспериментально, либо аналитически, с учетом специфики системы.

Безопасность ($K_{скр}$) отражает способность СМ сохранять собранную информацию от утечек и компрометации. Недостаточная безопасность увеличивает вероятность искажения или утраты данных, что, в свою очередь, усложняет диагностику и реализацию корректирующих мероприятий [18]. Влияние безопасности можно учитывать через коэффициент скрытности, интегрирующий вероятности компрометации информации:

$$K_{\text{скр}} = \left(\frac{N_{\text{зас}}}{N_{\text{зас}} + N_{\text{отк}}} \right)^{\alpha N_M} \times \frac{V_{\text{зас}}}{V_{\text{зас}} + V_{\text{отк}}}, \quad (16)$$

где:

- $N_{\text{зас}}, N_{\text{отк}}$ – количество засекреченных и открытых каналов;
- N_M – число элементов наблюдаемой системы, участвующих в процессе;
- $V_{\text{зас}}, V_{\text{отк}}$ – объемы ИИ, передаваемой по засекреченным и открытым каналам.

Время устранения отказа $T_{\text{устр}}$ с учетом объединения влияний полноты U и безопасности $K_{\text{скр}}$, можно показать следующим выражением:

$$T_{\text{устр}} = \frac{\beta}{K_{\text{скр}} \cdot \left(1 + \alpha \frac{U_{\min}}{U} \right)}, \quad (17)$$

где β – базовое время устранения отказа при оптимальных условиях, зависит от характеристик ремонтного процесса, определяется статистически или по нормативам, установленным для данной системы.

Для формального учета структуры данных ИИ вводится показатель эффективной полноты ИИ $U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)$ задаваемый выражением:

$$U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau) = \sum_{i=1}^m U_i w_i(\varepsilon, \tau), \quad (18)$$

где ε характеризует иерархический уровень пользователя, τ отражает класс информационных требований, U_i соответствует базовой полноте i -го класса данных, а $w_i(\varepsilon, \tau)$ – весовой коэффициент, определяющий значимость данного класса информации в конкретной конфигурации системы.

Для оценки влияния полноты данных на продолжительность устранения отказа вводится поправочный множитель, учитывающий соотношение между минимально необходимой полнотой $U_{\min}$ и фактически достигаемым значением $U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)$. Используется аппроксимация, основанная на принципе достаточной статистики:

$$\Delta T_{\text{диагн}} = \frac{\beta}{K_{\text{скр}} \cdot \left(1 + \alpha \frac{U_{\min}}{U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)} \right)}, \quad (19)$$

где α отражает, насколько быстро возрастает время диагностики при уменьшении $U_{\text{эфф}}$ до уровня $U_{\min}$.

Однако итоговые значения $T_{\text{восст}}$ (зависящие от $T_{\text{обн}}$ и $T_{\text{устр}}$) определяются не только полнотой (U) и безопасностью ($K_{\text{скр}}$) информации, но также структурой сенсорной сети. Избыточное количество датчиков и слишком частый опрос увеличивают объем передаваемых данных и задержки обработки, тогда как недостаточное покрытие или редкий опрос снижают точность диагностики, повышая риск некорректного устранения отказа.

Для решения этой проблемы используют известные подходы из области беспроводных сенсорных сетей (WSN), в частности задачу покрытия (*Coverage Problem*), трактуемую как задачу выбора минимального набора датчиков, удовлетворя $U_{\min}$. Такой подход часто реализуют приближенными жадными алгоритмами, где на каждом шаге отбирается датчик с наибольшим приростом «полезной» полноты при минимальной «стоимости» в виде дополнительного объема данных ИИ. Подобная оптимизация сокращает как избыточность датчиков, так и совокупные задержки $T_{\text{сб}}$ и $T_{\text{обр}}$, способствуя уменьшению $T_{\text{устр}}$.

Далее применяется адаптивная стратегия изменения частоты опроса (*Adaptive Sampling*), позволяющая динамически регулировать нагрузку. К примеру, при росте $\gamma_{\text{рзп}}$ целесообразно временно увеличить частоту опроса критичных датчиков для точной диагностики, тогда как в «спокойные» периоды частоту уменьшают, снижая нагрузку на каналы связи. Пусть в результате решения задачи покрытия выделено подмножество $\Theta^* \subseteq \Theta$

с датчиками θ_j , каждому из которых назначена частота опроса $\{f_j\}$. Тогда эффективная полнота приобретает вид:

$$U_{эфф}(\varepsilon, \tau, \{f_j\}) = \sum_{\theta_j \in \Theta^*} U_j w_j(\varepsilon, \tau, \{f_j\}), \quad (20)$$

где U_j – базовая полнота данных датчика θ_j , а w_j учитывает приоритеты и частоту опроса. В дальнейшем это значение используется при вычислении временных характеристик мониторинга и восстановительных процедур с учетом адаптивной перестройки сети.

Внедрение этих подходов в модель позволяет:

Сначала, с помощью приближенного (жадного) алгоритма для задачи покрытия, определить рациональный набор датчиков, обеспечивающих достаточную полноту для данного иерархического уровня ε и класса информационных требований τ . Это снизит избыточность и уменьшит дополнительные задержки при сборе и обработке данных ИИ, влияя на $T_{обн}$.

Затем, используя адаптивную стратегию опроса, подстроить частоту съема данных таким образом, чтобы поддерживать $U_{эфф}(\varepsilon, \tau, \{f_j\})$ на оптимальном уровне при минимуме «избыточного» трафика. Это отразится на $T_{обр}$ и, как следствие, на $T_{устр}$.

Комбинация этих методов позволит еще точнее оценить $T_{устр}$:

$$T_{устр} = \frac{\beta}{K_{скр} \cdot \left(1 + \alpha \frac{U_{min}}{\sum_{\theta_j \in \Theta^*} U_j w_j(\varepsilon, \tau, f_j)} \right)}, \quad (21)$$

где $U_{эфф}(\varepsilon, \tau, \{f_j\})$ теперь будет формироваться не просто за счет выбора параметров U и весов w_j , но и через оптимизацию состава сенсорной сети (решение задачи покрытия) и адаптивный опрос (определение частоты съема данных), что повышает качество информации без чрезмерной нагрузки.

На основании выражения (4), в сочетании с результатами оптимизационных задач маршрутизации ($T_{сб}$) и распределения вычислительных ресурсов ($T_{обр}$), а также с учетом влияния полноты, безопасности информации, структуры сенсорной сети и адаптивности частоты опроса датчиков ($T_{устр}$), можно представить время восстановления после отказа следующим образом:

$$T_{восст} = \frac{V_{\Sigma}}{R_{эфф,сист}} + \frac{U \cdot V_{ед}}{R_{срвм} \cdot \frac{N_{паралл}}{k_{загр}}} + \frac{\beta}{K_{скр} \cdot \left(1 + \alpha \frac{U_{min}}{\sum_{\theta_j \in \Theta^*} U_j w_j(\varepsilon, \tau, f_j)} \right)}. \quad (22)$$

В таком виде модель, интегрирующая методы оптимизации из теории сетей (задачи покрытия), адаптивное управление опросом датчиков и учет факторов противодействия, ресурсных ограничений и параметров мониторинга, позволяет произвести расчеты и построить графики зависимости $T_{устр}$ и $T_{восст}$ от различных конфигураций сенсорной сети и параметров опроса. Сравнение результатов с применением и без применения приближенных алгоритмов WSN наглядно демонстрирует преимущества такого комплексного подхода, повышая научную обоснованность и практическую применимость разработанной модели в условиях эксплуатации УС.

Влияние времени восстановления и коэффициента готовности наблюдаемой системы на вероятность своевременной доставки сообщений узла связи

Подробная детализация структуры времени восстановления $T_{восст}$, включающего $T_{обн}$ и $T_{устр}$, показывает, что уменьшение $T_{восст}$ даёт операционный выигрыш в повышении

оперативной готовности техники связи и ускорении устранения отказов. Наряду с этим рассматривается коэффициент готовности системы $K_{г,сист}$, отражающий среднюю долю времени, когда телекоммуникационное оборудование остается в работоспособном состоянии.

Для оценки качества, создаваемой СМ, необходимо определить оценку эффективности функционирования УС в котором она применена [17, 18]. Эффективность функционирования УС основывается на определении вероятности своевременной доставки сообщений [19], что непосредственно связано с качеством работы системы мониторинга. В этом контексте можно рассмотреть, как СМ влияет на метасистему, то есть на эффективность функционирования УС. Для того чтобы оценить этот вклад, необходимо рассчитать вероятность того, что время доставки сообщений на УС не превысит установленные пределы, что необходимо для обеспечения оперативности и точности работы системы.

Данная модель направлена на вычисление зависимости между фактическим временем доставки сообщений и установленным пределом времени, а также определение вероятности того, что время доставки не выйдет за рамки допустимого. Это позволяет исследовать, как СМ влияет на общую эффективность функционирования УС, принимая во внимание параметры, которые непосредственно влияют на процесс доставки сообщений.

Тогда вероятность своевременной доставки сообщений определяется выражением:

$$P_{св,k} = P\{T_{дост,k} \leq T_{тр,k}\}, \quad (23)$$

где $T_{дост,k}$ – время доставки k -го сообщения, $T_{тр,k}$ – установленный предел времени доставки k -го сообщения.

В типовых подходах [19, 20] к оценке вероятности своевременной доставки используется модель, предполагающая, что $P_{св,k}$ представляется произведением «готовности» на «временной» множитель. Пусть $\prod_{i=1}^N K_{г,i}$ характеризует готовность наблюдаемой системы, а $\frac{T_{тр,k}}{T_{тр,k} + T_{восст}}$ отвечает за временной фактор (если $T_{восст} \ll T_{тр,k}$, кривая близка к 1):

$$P_{св,k} = \left(\prod_{i=1}^N K_{г,i} \right) \cdot \frac{T_{тр,k}}{T_{тр,k} + T_{восст}} \quad (24)$$

Коэффициент готовности наблюдаемой системы $K_{г,сист}$ учитывает интенсивности отказов и восстановления каждого i -го элемента (модуля) ОМ используются параметры интенсивностей отказов и восстановления [21, 22]. Для его расчета вводится локальный показатель:

$$K_{г,i} = \frac{\mu_{0i} + \Delta\mu_i}{\lambda_{0i} + \gamma_i + \mu_{0i} + \Delta\mu_i}, \quad (25)$$

где:

- μ_{0i} – интенсивность базового восстановления i -го объекта мониторинга;
- $\Delta\mu_i$ – дополнительная интенсивность восстановления, обусловленная повышенным качеством мониторинга;
- λ_{0i} – интенсивность отказов (базовая);
- γ_i – интенсивность воздействия противника (например, радиоэлектронного подавления или огневых воздействий).

Совокупный коэффициент готовности наблюдаемой системы определяется перемножением частных коэффициентов:

$$K_{г,сист} = \prod_{i=1}^N K_{г,i}. \quad (26)$$

Параметры интенсивности отказов (λ_{0i}) и восстановления (μ_{0i} , $\Delta\mu_i$) являются критически важными для точности моделирования надежности телекоммуникационной системы. Эти параметры могут варьироваться в зависимости от специфики ТКО и условий эксплуатации. Например, интенсивности отказов и восстановления могут быть определены

через статистические данные о частоте сбоев и времени восстановления для различных типов ТКО. В работах, посвященных расчетам отказоустойчивости в телекоммуникационных системах, таких как [22, 23], предложены числовые значения для этих параметров, что позволяет использовать их для калибровки моделей в реальных условиях. Для повышения точности расчетов следует использовать данные, основанные на характеристиках конкретной сети, учитывая особенности ее конфигурации и воздействия внешних факторов, типа радиоэлектронное подавление и физические воздействия.

Таким образом, вероятности своевременной доставки сообщений УС можно представить следующим выражением:

$$P_{св,k} = \left(\prod_{i=1}^N \frac{\mu_{0i} + \Delta\mu_i}{\lambda_{0i} + \gamma_i + \mu_{0i} + \Delta\mu_i} \right) \cdot \frac{T_{тр,k}}{T_{тр,k} + T_{восст}}. \quad (27)$$

На основе полученных результатов можно выделить несколько ключевых факторов, определяющих эффективность функционирования наблюдаемой системы ТКО:

1) Поддержка высокой готовности системы ($K_{г,сист}$) достигается за счет увеличения интенсивности восстановления μ_{0i} , $\Delta\mu_i$ и снижения рисков λ_{0i} , γ . Это может потребовать дополнительных ресурсов техники связи, таких как резервное ТКО и улучшенные регламенты технического обслуживания.

2) Минимизация времени восстановления $T_{восст}$ требует эффективных методов мониторинга (уменьшение $T_{обн}$) и ускорения процедур устранения отказов (снижение $T_{устр}$). Оба этих фактора напрямую зависят от архитектуры системы мониторинга, ее способности собирать полные и точные данные, а также уровня автоматизации процессов ремонта.

3) В результате оптимального сочетания высокой готовности системы и минимального времени восстановления ($T_{восст}$) достигается значительное повышение вероятности своевременной доставки сообщений УС ($P_{св,k}$) до заданного предельного времени $T_{тр,k}$.

Таким образом, эффективность функционирования УС напрямую определяется двумя основными факторами: надежностными характеристиками системы (коэффициент готовности) и оперативностью восстановления (время $T_{восст}$). Совместная оптимизация этих факторов обеспечивает наибольшую вероятность своевременной доставки сообщений в условиях эксплуатации, что и является основной целью моделирования.

Цель моделирования процесса мониторинга технического состояния связи УС заключалась в исследовании влияния параметров (Z , Y , R) и состояния наблюдаемых объектов A на временные характеристики мониторинга ($T_{сб}$, $T_{обр}$, $T_{обн}$, $T_{устр}$), которые, в свою очередь, определяют время восстановления после отказа ($T_{восст}$) и коэффициент готовности системы ($K_{г,сист}$). Модель четко демонстрирует влияние этих показателей на эффективность функционирования УС, выражающуюся через вероятность своевременной доставки сообщений на УС ($P_{св,k}$), и позволяет оценивать качество создаваемой СМ УС с точки зрения метасистемы.

Заключение

Для решения задач построения СМ УС целесообразно формирование и применение соответствующего методологического аппарата, раскрывающего основные процедуры моделирования исследуемых систем мониторинга.

Большинство современных активных систем мониторинга используют одинаковый принцип: система мониторинга неким образом опрашивает ТКО или программное обеспечение, получает результат и сравнивает его либо с шаблоном, либо с заранее заданными предельно допустимыми значениями.

Объем и своевременность получаемой информации определяет качество принимаемых решений по управлению.

На основании проведенного исследования были выделены ключевые аспекты, существенно влияющие на эффективность функционирования системы мониторинга и восстановления после отказов на УС. Основной акцент сделан на поддержании высокой

готовности наблюдаемой системы, что требует применения дополнительных ресурсов для поддержания инфраструктуры и совершенствования процессов технического обслуживания. Эти ресурсы включают в себя как резервное оборудование, так и оптимизацию процедур диагностики и устранения неисправностей. В условиях ведения современных операций это особенно критично, так как постоянные изменения внешней обстановки, влияние дестабилизирующих факторов и высокая степень неопределенности требуют, чтобы средства управления войскам и оружием (объекты мониторинга) были готовы к мгновенным откликам на изменения и оперативному восстановлению.

Для моделирования системы мониторинга применялся комплекс аналитических методов, основывающихся на положениях теории надежности, теории массового обслуживания, системного анализа и методах оптимизации (линейное, целочисленное программирование и достаточная статистика). Такое сочетание позволяет формализовать временные характеристики мониторинга ($T_{сб}$, $T_{обр}$, $T_{обн}$, $T_{устр}$) и связать их с вероятностно-временными показателями ($T_{восст}$, $K_{г,сист}$) с учетом ограничений по ресурсам и воздействиям противника. В отличие от упрощенных или статичных подходов, аналитическая модель дает возможность учесть сложную структуру сенсорной сети (задачи покрытия и адаптивного опроса датчиков), а также влияние внешних факторов, что крайне важно для точного прогнозирования и оперативного управления в условиях боевых действий, требующих высокой адаптивности эксплуатируемой системы ТКО.

Таким образом, разработанная аналитическая модель процесса сбора ИИ в СМ УС может быть использована для решения ряда задач по построению архитектуры СМ УС, повышению ее эффективности и устойчивости в условиях ведения современных операций.

Литература

1. Боговик А. В., Сафиулов Д. М. Методологический подход к формированию архитектуры системы мониторинга технического состояния техники связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 176-182.
2. Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А. Математические модели процесса мониторинга технического состояния радиосредств специального назначения // Техника средств связи. – 2024. – № 3(167). – С. 31-41.
3. Боговик А. В., Сафиулов Д. М. Системный анализ реализации работы автоматизированной системы мониторинга технического состояния техники связи узлов связи пунктов управления оперативного объединения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 248-251.
4. ГОСТ Р 27.102-2021 Национальный стандарт Российской Федерации «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения». М.: Стандартинформ, 2021. 46 с.
5. Науменко А. П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль. – Омск: Омский государственный технический университет, 2019. – 152 с.
6. Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А. Обоснование требований к системе мониторинга технического состояния техники связи узла связи пункта управления оперативного объединения // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : Труды IX Межвузовской научно-практической конференции: Сборник материалов, Санкт-Петербург, 17 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2024. – С. 22-28.
7. Боговик А. В., Сафиулов Д. М. Модель управления процессом мониторинга технического состояния телекоммуникационных систем // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : Материалы VIII межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2023. – С. 66-71.
8. Боев В. Д. Основы моделирования военной техники связи: Учеб. пособие. – СПб. : ВАС, 2011. – 424 с.
9. Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А. Модели для анализа прогнозируемых воздействий на систему мониторинга техники связи на узле связи пункта управления оперативного

объединения // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : Труды IX Межвузовской научно-практической конференции: Сборник материалов, Санкт-Петербург, 17 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2024. – С. 14-21.

10. Нефедов В. И., Сигов А. С. Общая теория связи : учебник для вузов / под редакцией В. И. Нефедова. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 592 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-19215-5. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/556153> (дата обращения: 7.02.2025)

11. Волков Д. В., Саенко И. Б., Старков А. М. Методика оценки пропускной способности сети связи специального назначения в условиях деструктивных воздействий на элементы сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 391-395.

12. Листопад Н. И., Бука Л. О. Маршрутизация информационных потоков в мультисервисных сетях с учетом требований качества обслуживания // Информатизация образования. – 2016. – № 2. – С. 33-40.

13. Меркушев О. В. Модель маршрутизации по критерию надежности в распределенной системе передачи данных // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 73-80.

14. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности : учебное пособие для вузов Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

15. Ткачев Д. Ф., Ткачев А. Ф. Интеграция сетей радиосвязи специального назначения в единое информационное пространство на основе применения средств радиосвязи шестого поколения – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2017. – № 1 (135). – С. 87-89. – URL: <https://moluch.ru/archive/135/37753/>.

16. Тутова Н. В. Разработка методики оптимизации распределения ресурсов центров обработки данных в сети Интернет: дисс. канд. техн. наук. – М. : РГТЭУ, 2017. – 120 с. – URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodiki-optimizatsii-raspredeleniya-resurov-tsentrov-obrabotki-dannykh-v-seti-i> (дата обращения: 13.02.2025).

17. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – Санкт-Петербург: ВАС, 2006. 184 с.

18. Боговик А. В., Игнатов В. В. Теория управления в системах военного назначения: Учебник. – Санкт-Петербург: ВАС, 2008. – 460 с.

19. Голубцов С. Г., Аскерко А. В., Милашевский А. В., Легкий А. С. Методика оценки эффективности функционирования системы (сети) связи специального назначения по показателю устойчивости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 221-227.

20. Калмыков Д. А., Кривцов С. П., Тевс О. П. Расчет своевременности доставки сообщений в системе связи специального назначения в условиях воздействия противника // Труды учебных заведений связи. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 67-73.

21. Андреев А. В., Яковлев В. В., Короткая Т. Ю. Теоретические основы надежности технических систем / учебное пособие – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018 – 164 с.

22. Шувалов В. П., Зеленцов Б. П., Квиткова И. Г. Методика оценки коэффициента готовности системы с резервированием. Пассивный режим // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2020. – Т. 14, № 8. – С. 21-25.

23. Батенков К. А., Фокин А. Б. Анализ надежности телекоммуникационных сетей, поддерживающих механизмы защитного переключения и восстановления для одного основного маршрута // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 65. – С. 58-68.

References

1. Bogovik A. V., Safiulov D. M. *Metodologicheskiiy podkhod k formirovaniyu arkhitektury sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya tekhniki svyazi* [Methodological approach to the formation of the architecture of the monitoring system for the technical condition of communication equipment]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2024. No. 2. Pp. 176–182. (In Russian).

2. Bogovik A. V., Safiulov D. M., Schmidt A. A. Mathematical models of the monitoring process for the technical condition of special-purpose radio equipment. *Means of Communication Equipment*. 2024. No. 3(167). Pp. 31–41. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-31-41
3. Bogovik A. V., Safiulov D. M. *Sistemnyy analiz realizatsii raboty avtomatizirovannoy sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya tekhniki svyazi uzlov svyazi punktov upravleniya operativnogo ob'edineniya* [System analysis of the operation of an automated monitoring system for the technical condition of communication equipment at communication nodes of control points of the operational association]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2023. No. 2. Pp. 248–251. (In Russian).
4. GOST R 27.102-2021 National Standard of the Russian Federation “Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions”. Moscow. Standartinform publ. 2021. 46 p. (In Russian).
5. Naumenko A. P. *Vvedenie v tekhnicheskuyu diagnostiku i nerazrushayushchiy control* [Introduction to technical diagnostics and non-destructive testing]. Omsk. Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet [Omsk State Technical University]. 2019. 152 p. (In Russian).
6. Bogovik A. V., Safiulov D. M., Schmidt A. A. *Obosnovanie trebovaniy k sisteme monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya tekhniki svyazi uzla svyazi punkta upravleniya operativnogo ob'edineniya* [Substantiation of requirements for the monitoring system of the technical condition of communication equipment at the communication node of the control point of the operational association]. *Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh: Trudy IX Mezhevuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sbornik materialov, Sankt-Peterburg, 17 maya 2024 goda* [Problems of technical support of troops in modern conditions: Proceedings of the IX Interuniversity Scientific and Practical Conference: Collection of materials, St. Petersburg, May 17, 2024]. St. Petersburg: Voennaya akademiya svyazi im. Marshala Sovetskogo Soyuza S. M. Budennogo [Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny], 2024. Pp. 22–28. (In Russian).
7. Bogovik A. V., Safiulov D. M. *Model upravleniya protsessom monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya telekommunikatsionnykh sistem* [A management model for the monitoring process of the technical condition of telecommunication systems]. *Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh: Materialy VIII Mezhevuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 14 aprelya 2023 goda* [Problems of technical support of troops in modern conditions: Proceedings of the VIII Interuniversity Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, April 14, 2023]. St. Petersburg: Voennaya akademiya svyazi im. Marshala Sovetskogo Soyuza S. M. Budennogo [Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny], 2023. Pp. 66–71. (In Russian).
8. Boev V. D. *Osnovy modelirovaniya voennoy tekhniki svyazi: Ucheb. posobie* [Fundamentals of modeling military communication equipment: Textbook]. St. Petersburg. Military Academy of Communications, 2011. 424 p. (In Russian).
9. Bogovik A. V., Safiulov D. M., Schmidt A. A. *Modeli dlya analiza prognozirovemykh vozdeystviy na sistemu monitoringa tekhniki svyazi na uzle svyazi punkta upravleniya operativnogo ob'edineniya* [Models for the analysis of predicted impacts on the monitoring system of communication equipment at the communication node of the control point of the operational association]. *Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh: Trudy IX Mezhevuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sbornik materialov, Sankt-Peterburg, 17 maya 2024 goda* [Problems of technical support of troops in modern conditions: Proceedings of the IX Interuniversity Scientific and Practical Conference: Collection of materials, St. Petersburg, May 17, 2024]. St. Petersburg: Voennaya akademiya svyazi im. Marshala Sovetskogo Soyuza S. M. Budennogo [Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny], 2024. Pp. 14–21. (In Russian).
10. Nefedov V. I., Sigov A. S. *Obshchaya teoriya svyazi: uchebnyk dlya vuzov* [General theory of communication: a textbook for universities]. Ed. by V. I. Nefedov. Moscow. Yurayt publ., 2024. 592 p. (Vysshee obrazovanie [Higher Education]). ISBN 978-5-534-19215-5. Text: electronic. *Obrazovatel'naya platforma Yurayt* [Educational platform Yurayt] [website]. URL: <https://urait.ru/bcode/556153> (accessed 07.02.2025). (In Russian).
11. Volkov D. V., Saenko I. B., Starkov A. M. *Metodika otsenki propusknoy sposobnosti seti svyazi spetsial'nogo naznacheniya v usloviyakh destruktivnykh vozdeystviy na elementy seti* [Methodology for assessing the throughput of a special-purpose communication network under destructive impacts on its

elements]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2018. No. 12. Pp. 391–395. (In Russian).

12. Listopad N. I., Buka L. O. *Marshrutizatsiya informacionnykh potokov v mul'tiservisnykh setyakh s uchetom trebovaniy kachestva obsluzhivaniya* [Routing of information flows in multiservice networks with regard to quality of service requirements]. *Informatizatsiya obrazovaniya* [Informatization of Education]. 2016. No. 2. Pp. 33–40. (In Russian).

13. Merkushev O. V. *Model marshrutizatsii po kriteriyu nadezhnosti v raspredelennoy sisteme peredachi dannykh* [A routing model based on reliability criteria in a distributed data transmission system]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of IzhSTU named after M. T. Kalashnikov]. 2019. Vol. 22, No. 2. Pp. 73–80. (In Russian).

14. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of reliability theory: a textbook for universities]. St. Petersburg: BHV-Peterburg publ., 2006. 704 p. (In Russian).

15. Tkachev D. F., Tkachev A. F. *Integratsiya setey radiosvyazi spetsial'nogo naznacheniya v edinoye informatsionnoe prostranstvo na osnove primeneniya sredstv radiosvyazi shestogo pokoleniya* [Integration of special-purpose radio networks into a single information space based on the use of sixth-generation radio communications]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist]. 2017. No. 1 (135). Pp. 87–89. URL: <https://moluch.ru/archive/135/37753/> (accessed 13.02.2025). (In Russian).

16. Tutova N. V. *Razrabotka metodiki optimizatsii raspredeleniya resursov tsentrov obrabotki dannykh v seti Internet: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a method for optimizing the distribution of data center resources on the Internet: PhD (Tech.) thesis]. Moscow: RGTEU, 2017. 120 p. URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodiki-optimizatsii-raspredeleniya-resursov-tsentrov-obrabotki-dannykh-v-seti-i> (accessed 13.02.2025). (In Russian).

17. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Effektivnost' sistem voennoy svyazi i metody ee otsenki* [Effectiveness of military communication systems and methods for its assessment]. St. Petersburg. Military Academy of Communications publ., 2006. 184 p. (In Russian).

18. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Teoriya upravleniya v sistemakh voennogo naznacheniya* [Control theory in military systems]. St. Petersburg. Military Academy of Communications publ., 2008. 460 p. (In Russian).

19. Golubtsov S. G., Askerko A. V., Milashevskiy A. V., Legkiy A. S. *Metodika otsenki effektivnosti funktsionirovaniya sistemy (seti) svyazi spetsial'nogo naznacheniya po pokazatelyu ustoychivosti* [Methodology for assessing the effectiveness of a special-purpose communication system (network) in terms of stability]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2021. No. 9. Pp. 221–227. (In Russian).

20. Kalmykov D. A., Krivtsov S. P., Tevs O. P. *Raschet svoevremennosti dostavki soobshcheniy v sisteme svyazi spetsial'nogo naznacheniya v usloviyakh vozdeystviya protivnika* [Calculation of the timeliness of message delivery in a special-purpose communication system under enemy impact]. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of Educational Institutions of Communications]. 2016. Vol. 2, No. 4. Pp. 67–73. (In Russian).

21. Andreev A. V., Yakovlev V. V., Korotkaya T. Yu. *Teoreticheskie osnovy nadezhnosti tekhnicheskikh sistem* [Theoretical foundations of reliability of technical systems]. St. Petersburg. Polytechnic University Press, 2018. 164 p. (In Russian).

22. Shuvalov V. P., Zelentsov B. P., Kvitkova I. G. *Metodika otsenki koeffitsienta gotovnosti sistemy s rezervirovaniem. Passivnyy rezhim* [Methodology for assessing the availability factor of a system with redundancy. Passive mode]. *T-Comm*. 2020. Vol. 14, No. 8. Pp. 21–25. (In Russian).

23. Batenkov K. A., Fokin A. B. *Analiz nadezhnosti telekommunikatsionnykh setey, podderzhivayushchikh mekhanizmy zashchitnogo pereklyucheniya i vosstanovleniya dlya odnogo osnovnogo marshruta* [Analysis of the reliability of telecommunication networks supporting protection switching and restoration mechanisms for a single primary route]. *Vestnik Tomskogo GU. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Bulletin. Control, Computer Engineering and Informatics]. 2023. No. 65. Pp. 58–68. (In Russian).

Статья поступила 03 марта 2024 г.

Информация об авторе

Сафиулов Давлет Муратович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. Тел.: +7 (812) 247–98–42, E-mail: davletzas@mail.ru. Адрес: 194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Analytical model of the process of monitoring the technical condition of communication equipment of a special-purpose communication center

Safiullov D.M.

Annotation. *Modern special-purpose telecommunication systems operate under conditions of increased reliability and efficiency requirements. This is especially true when performing the tasks of command and control of troops and weapons during modern operations. The article considers the existing approaches to monitoring the technical condition of communication equipment at special-purpose communication nodes and proposes an analytical model of its monitoring process. The model combines time and reliability parameters (including failure rate and recovery, channel bandwidth, packet loss probabilities), and also takes into account external influences (electronic jamming) and limited resources. The paper analyzes the role of the monitoring subsystem, which not only helps to reduce the time to detect and eliminate failures, but also allows you to evaluate the quality of monitoring in terms of the functioning of the system in whose interests it is used, that is, the effectiveness of the communication node. **The purpose** of the study is to develop a formalized approach that allows taking into account and optimizing the key parameters of the monitoring process to increase the stability and efficiency of the communication hub. **The scientific novelty** lies in the fact that the developed model, unlike well-known monitoring modeling approaches, takes into account the effectiveness of information decision-making. In the known models, monitoring provided only raw data for analysis, whereas in this model, time and reliability criteria are synthesized, which makes it possible to more accurately assess the impact of information solutions on the effectiveness of the meta-system. **The results confirm** the possibility of using the proposed analytical model to adapt real-time monitoring systems, which ultimately contributes to an increase in the combat readiness of units and operational management. **The practical significance** of the work lies in the fact that the formulated models and techniques can be implemented in the design and modernization of special-purpose communication control systems, ensuring a high degree of equipment readiness even in conditions of intense counteraction.*

Keywords: *analytical model, information collection time, recovery, sufficient statistics, availability coefficient, technical condition monitoring, completeness optimization, bandwidth, electronic suppression, telecommunication equipment, queuing theory, communication hub, troubleshooting.*

Information about authors

Safiullov Davlet Muratovich – The postgraduate student at the Department of technical support of communication and automation of the Military Academy of Communications. Field of research: information monitoring; data acquisition. Tel: +7 (812) 247 – 98 – 42. E-mail: davletzas@mail.ru. Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.

Для цитирования: Сафиулов Д. М. Аналитическая модель процесса мониторинга технического состояния техники связи узла связи специального назначения // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 12-32. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-12-32

For citation: Safiullov D.M. Analytical model of the process of monitoring the technical condition of communication equipment of a special-purpose communication center. Means of Communication Equipment. 2025. No 1 (169). Pp. 12-32. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-12-32

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-33-48

**Методика прогнозирования непреднамеренных радиопомех
в диапазоне 0,01–30 МГц и ее программная реализация**

Типикин А. А., Густов А. А.

Аннотация. Постановка задачи: возможность обеспечения связью стационарных и подвижных объектов в заданном районе определяется отношением сигнал/помеха. В условиях отсутствия преднамеренных помех одним из основных факторов снижения качества приема становится наличие непреднамеренных помех, включающих несколько различных компонентов. Прогнозирование непреднамеренных помех может быть выполнено на основе разработанных методик и соответствующих расчетных программ, опирающихся на рекомендации Международного союза электросвязи. Однако, недостатки, присущие существующим методикам и их программным реализациям, не позволяют в ряде случаев использовать их в расчетах показателей связи без существенных доработок. **Цель работы:** разработать методику прогнозирования непреднамеренных помех в диапазоне 0,01–30 МГц и соответствующую программную реализацию, устраняющую недостатки существующих методик для последующего применения в интересах прогнозирования зон обеспечения связью. **Используемые методы:** проведенный системный анализ позволил обобщить результаты, полученные в области прогнозирования непреднамеренных помех. Устранение недостатков существующих методов и их программных реализаций, обеспечение совместимости с некоторыми методами прогнозирования энергетических параметров радиотрасс выполнено на основе системного подхода. **Новизна:** разработанная методика и соответствующая программная реализация обеспечили устранение трансэкваториального скачка характеристик атмосферных помех, обусловленного различием аппроксимационных сезонных функций частотного приведения эффективного коэффициента шума, приведение карт помеховых характеристик к всемирному скоординированному времени, внедрение возможности учета вероятности превышения заданного уровня шума при вычислении напряженности поля помех и мощности помех и ряд других изменений. **Практическая значимость:** программная реализация методики выполнена в виде пакета расширения *mRNoise* для системы моделирования *Matlab*. Пакет расширения *mRNoise* доступен на открытых ресурсах *Matlab-Central* и *GitHub*. Результаты прогнозирования напряженности поля помех и мощности помех могут быть в дальнейшем использованы для определения качества связи в заданных районах.

Ключевые слова: амплитудное распределение помех, атмосферные помехи, галактические помехи, индустриальные помехи, превышения заданного уровня помех, эффективный коэффициент шума.

Введение

Для определения качества связи с подвижным объектом в возможном районе его действий, при отсутствии преднамеренных помех необходимо кроме энергетических параметров сигнала знать прогнозируемые уровни непреднамеренных помех [1]. С одной стороны, существует достаточно подробная рекомендация Международного союза электросвязи МСЭ Р.372-17 [2], которая регламентирует расчет суммарной помехи в диапазоне 0,01-30 МГц, складывающейся из атмосферного, галактического и индустриального компонентов. На базе рекомендаций МСЭ разработано несколько методик, позволяющих выполнять расчеты для заданного месяца года m , времени суток h [ч], географической широты lat [град] и географической долготы lon [град]. К таким методикам можно отнести, например, работу [3]. Более того, некоторые методики уже имеют готовую программную реализацию в виде готовых к использованию программ или библиотек [4, 5]. С другой стороны, ни одна из известных методик или программных реализаций не охватывает в полной мере все аспекты рекомендации [2]. Так например, в методике [3] не приведены сведения о возможности прогнозирования уровня помех, отличного от медианного, т. е. при вероятности превышения заданного уровня помехи $p \neq 0,5$. Программная реализация [4] не позволяет выполнить

интерполяцию в экваториальной зоне для коэффициента атмосферных помех F_a , что приводит к экваториальному скачку атмосферной помехи на частотах отличающихся от 1 МГц. Программы [4, 5] не имеют возможности строить карты уровней помех для всемирного скоординированного времени (UTC). Указанные аспекты приводят к тому, что необходима доработка приведенных методик, а, учитывая результаты, достигнутые в работах [6, 7] по прогнозированию энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот, целесообразна разработка программной реализации рекомендации [2] на единой технологической основе. Совокупно указанные недостатки определяют цель исследования, которая заключается в совершенствовании методики прогнозирования непреднамеренных помех в диапазоне 0,01–30 МГц и разработки соответствующей программной реализации для последующего применения в интересах прогнозирования зон обеспечения связью.

Модель атмосферных помех

Непреднамеренные помехи в соответствии с рекомендацией [2] включают в себя три компонента – атмосферные помехи, промышленные помехи и галактические шумы. Атмосферные помехи являются одним из наиболее существенных компонентов, а на частотах ниже приблизительно 300 кГц – доминирующим, и рассчитываются на базе эффективного коэффициента шума f_a или логарифмического эффективного коэффициента шума F_a [8]:

$$f_a = \frac{P_n}{kT_0b}; \quad F_a = 10 \lg f_a, \quad (1)$$

где P_n – мощность помех на выходе антенны без учета потерь в антенне; k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/К]; $T_0 = 288$ – эталонная шумовая температура [К]; b – рабочая полоса частот системы связи [Гц].

Среднеквадратичное значение напряженности поля шумов, выраженное в децибелах относительно 1 мкВ/м для полосы B , дБ/Гц, представляется в виде [9, 10]:

$$E_n = F_a + 20 \lg f_{MГц} + B - 95,5 \quad [\text{дБ} / (\text{мкВ} / \text{м})], \quad (2)$$

где $f_{MГц}$ – центральная частота полосы Δf [МГц]; Δf – полоса частот [Гц]; $B = 10 \lg \Delta f$.

Эффективный коэффициент шумов антенны F_a определяется внешними шумами, получаемыми от короткого вертикального монополя ($h \ll \lambda$, h – высота, λ – длина волны на рабочей частоте) без потерь, расположенного над идеально проводящей землей.

Проведенные исследования [11] показали, что изменчивость f_a для заданного сезона и времени суток адекватно моделируется двумя логнормальными распределениями, одно из которых покрывает область выше медианы, а другое – ниже. Распределение задается с помощью трех величин F_{am} , D_u и D_l , где F_{am} – медианное значение F_a , $F_{am} + D_u$ – значение мощности шумов, превышенное в течение 10 % времени в пределах прогнозируемого временного интервала [дБ], $F_{am} - D_l$ – значение мощности шумов, превышенное в течение 90 % времени в пределах прогнозируемого временного интервала [дБ].

Значения F_{am} на частоте 1 МГц аппроксимируются с помощью разложения в ряды Фурье [3, 12] по широте и по долготе для заданного временного блока местного времени (LT) h – 0:00–4:00, 4:00–8:00, 8:00–12:00, 12:00–16:00, 16:00–20:00 и 20:00–24:00 и заданного периода года s – 1 {декабрь, январь, февраль}, 4 {март, апрель, май}, 7 {июнь, июль, август}, 10 {сентябрь, октябрь, ноябрь}. Следует отметить, что в рекомендации МСЭ [2] для определения F_{am} в отличие от некоторых более ранних редакций указываются не сезоны года, а периоды месяцев, в то время как одинаковые сезоны в северном и южном полушарии различаются на 6 месяцев.

Для аппроксимации широтной вариации параметра широтная шкала преобразуется из $-90^\circ \leq x \leq 90^\circ$ в $0 \leq \chi \leq \pi$ и задается функция $g(\chi)$, таким образом, чтобы

$$\begin{aligned} f(\chi) &= g(\chi) = \alpha + \beta \chi, \quad 0 \leq \chi \leq l; \\ g(\chi) &= -g(-\chi), \quad -l \leq \chi \leq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где l – граница интервала аппроксимации, а α и β выбираются исходя из граничных условий:

$$g(0) = 0; \quad g(l) = 0. \quad (4)$$

Подобная замена дает более быстрое схождение ряда Фурье в отличие от прямого разложения $f(x)$.

Функция $g(x)$ разлагается в ряд Фурье вида

$$g(x) = b_1 \sin \frac{\pi}{l} x + b_2 \sin \frac{2\pi}{l} x + \dots + b_i \sin \frac{i\pi}{l} x + \dots, \quad (5)$$

причем

$$g(x) = f(x) - f(0) - \frac{f(l) - f(0)}{l} x. \quad (6)$$

В выражении (5) коэффициенты b_i вычисляются с помощью формулы

$$b_i = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^{n-1} g(jh) \sin ij \frac{\pi}{n}, \quad i = 1, \dots, 29. \quad (7)$$

Количество широтных коэффициентов $K = 29$ выбрано методом пороговой частоты. Таким образом, на первом шаге для каждой выбранной долготы формируется массив из 29 коэффициентов. Второй шаг заключается в поиске долготных коэффициентов для аппроксимации долготной вариации параметра через найденные коэффициенты b_i . Для этого долготная шкала преобразуется из $0^\circ \leq x \leq 360^\circ$ (к востоку от нулевого меридиана) в $0 \leq x \leq \pi$. Снова выполняется разложение в ряд Фурье, аналогично описанному выше варианту, за исключением того, что в силу $f(0) = f(\pi)$, в выражении (6) $f(0)$ заменяется константой:

$$g(x) = f(x) - \chi. \quad (8)$$

Для адекватного представления b_i в этом случае достаточно 15 членов ряда. Подобная аппроксимация дает погрешность 3,17 дБ, что считается хорошим результатом на фоне общей изменчивости результатов измерений атмосферных помех [12].

Исходные данные для вычисления F_{am} даны в файлах коэффициентов международного союза электросвязи (МСЭ), которые могут быть получены из архивов на ресурсе *Github* [4]. Чтобы перейти от F_{am} на частоте 1 МГц к F_{am} на заданной частоте следует воспользоваться аппроксимацией частотной зависимости в виде полинома 6-й степени, полученной методом наименьших квадратов [13]:

$$Y(X, F_{am}) = A_1(F_{am}) + A_2(F_{am})X + A_3(F_{am})X^2 + \dots + A_7(F_{am})X^6, \quad (9)$$

где f – рабочая частота в МГц,

$$X = \frac{8 \cdot 2^{\lg f} - 11}{4}. \quad (10)$$

Исходные данные для частотной аппроксимации F_{am} доступны на ресурсе [4].

С учетом (9) и (10) можно получить карты F_{am} на заданной частоте, что показано на рис. 1, где для частоты 3 кГц выполнена линейная экстраполяция. На рисунке не учитываются сезонные различия частотных аппроксимаций в северном и южном полушариях.

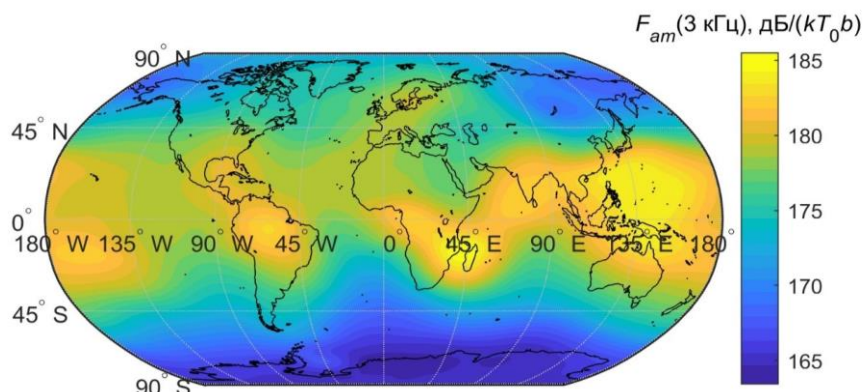


Рис. 1. Карта коэффициента атмосферных помех F_{am} , приведенного к частоте 3 кГц (январь, 4:00 LT)

Следует отметить, что графики F_{am} на частоте 1 МГц в рекомендации [2] приведены к одному месяцу года независимо от сезона, в то время как частотная аппроксимация F_{am} дана посезонно. Это означает, что, например, в январе, значения F_{am} на частоте 1 МГц в северном полушарии должны аппроксимироваться зимней частотной функцией, а в южном полушарии – летней. Такая ситуация приводит к возникновению резкой экваториальной границы (трансэкваториального скачка) в значениях F_{am} , приведенных к заданной частоте. Как показывают расчеты, при приведении F_{am} к заданной частоте трансэкваториальный скачок параметра в зависимости от частоты может составлять от нескольких дБ до нескольких десятков дБ, что, в конечном счете, отражается на форме границ прогнозируемых зон гарантированного обеспечения связью, которые, например, для диапазона очень низких частот, могут быть рассчитаны с помощью методик [6, 7]. Для устранения указанного недостатка предлагается выполнить интерполяцию в экваториальной полосе путем взвешенного арифметического усреднения F_{am} с плавным изменением весовых коэффициентов [14].

Также следует отметить, что местным временем (LT) в точке приема можно пользоваться для прогнозирования отношения сигнал/помеха на выраженной широтной радиотрассе, т. е. радиотрассе, ориентированной вдоль некоторого меридиана. На практике часто приходится иметь дело с долготными трассами или промежуточными вариантами, при которых сегменты радиотрассы располагаются в разных часовых поясах.

Если стоит задача определения возможности приема только в точке, расположенной в конце радиотрассы, то достаточно получить характеристики помех в этих координатах для заданного местного времени. Но если идет речь о районе, т. е. области пространства, в котором с заданной вероятностью прогнозируется обеспечение связью, где определенным образом выбран массив точек приема, то приходится использовать несколько карт с соответствующими значениями местного времени. Пространственная постановка задачи по обеспечению связи в географическом районе приводит к тому, что целесообразнее иметь одну карту, привязанную к всемирному скоординированному времени (UTC), которая бы позволила проводить расчеты во всех заданных точках района.

Значения времени LT и UTC совпадают вдоль нулевого меридиана, при этом к востоку от него время LT увеличивается на час каждые 15° долготы, достигая разницы +12 часов относительно UTC на меридиане 180° в. д., а к западу от нулевого меридиана время LT уменьшается на час каждые 15° , достигая разницы –12 часов на меридиане 180° з. д. Для произвольной долготы значения времени UTC и LT связаны выражением:

$$LT = UTC + \frac{lon}{15^\circ}, \quad (11)$$

где для восточного полушария долгота lon – положительная, а для западного – отрицательная.

Приведение карт эффективного коэффициента шума F_{am} к времени UTC осуществляется с помощью выражения (11). В качестве примера на рис. 2 показаны карты эффективного коэффициента шума на частоте 1 МГц, приведенные к заданному времени UTC .

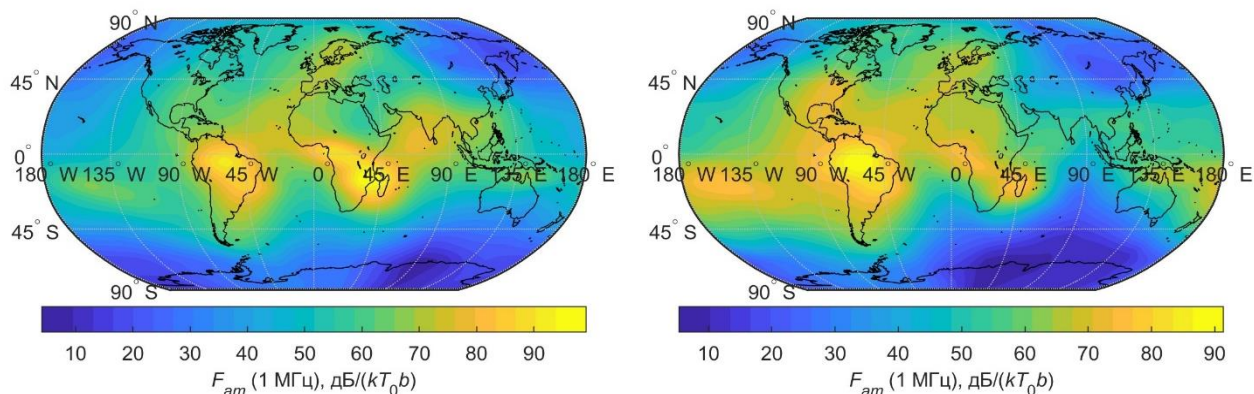


Рис. 2. Карты коэффициента шума F_{am} (1 МГц) приведенные к времени 0:00 UTC (слева), 4:00 UTC (справа)

Статистические характеристики атмосферных помех

Обычно атмосферную помеху рассматривают как случайный сигнал, который можно описать с помощью амплитудной и фазовой огибающих. Причем считают, что фаза распределена равномерно, а плотность вероятности распределения (*PDF*) мгновенной амплитуды помехи может быть получена из огибающей амплитудной *PDF*. Статистика огибающей атмосферных помех обычно измеряется в виде кумулятивной функции вероятности превышения заданного уровня помехи и называется распределением вероятностей амплитуды (*APD*).

Для некоторого уровня огибающей e_i величина *APD* будет являться долей времени T в течение которого огибающая была выше уровня e_i :

$$D(e) = \text{Prob}[e \geq e_i] = 1 - P(e), \quad (12)$$

где $P(e)$ – кумулятивная функция вероятности. *PDF* величины e будет производной $P(e)$.

Средняя огибающая уровней напряжения определяется как математическое ожидание (МО) e , т. е. $E[e]$:

$$e_{cp} = E[e] = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} e(t) dt = - \int_0^{\infty} e dD(e), \quad (13)$$

где $-dD(e) = P(e)de$.

Квадрат среднеквадратичного уровня огибающей напряжения (величина, пропорциональная мощности или энергии):

$$e_{rms}^2 = E[e^2] = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} e^2 dD(e). \quad (14)$$

Так как среднеквадратичный уровень напряжения может быть дан в абсолютных единицах (например, среднеквадратичный уровень напряженности поля или мощность принятой помехи), то обычно остальные уровни напряжений приводят к нему. Разница в дБ между усредненным напряжением и среднеквадратичным напряжением обозначается V_d :

$$V_d = -20 \lg \frac{e_{cp}}{e_{rms}}. \quad (15)$$

В рекомендации [2] статистические характеристики атмосферных помех D_u и D_l , аппроксимированы полиномом 4-й степени с помощью метода наименьших квадратов [15]:

$$Y(X) = A_1 + A_2 X + A_3 X^2 + A_4 X^3 + A_5 X^4, \quad (16)$$

где f – рабочая частота в МГц.

$$X = \lg f. \quad (17)$$

Аналогичным образом аппроксимированы параметры σ_{F_a} , σ_{D_u} , σ_{D_l} , V_d и σ_{V_d} . Графики статистических параметров атмосферных помех показаны на рис. 3.

Считается, что статистическое распределение величины f_a удовлетворительно аппроксимируется двумя логарифмически нормальными распределениями, т. е. двумя нормальными распределениями для величины F_a . Первое распределение описывает участок ниже медианного значения F_{am} с использованием величины D_l , а второе – выше F_{am} с использованием D_u . Медианой для обоих распределений является величина F_{am} , а среднеквадратическое отклонение (СКО) может быть найдено из формул [16]:

$$\sigma_u = \frac{D_u}{\psi(0,9)}; \quad (18)$$

$$\sigma_l = -\frac{D_l}{\psi(0,1)} = \frac{D_l}{\psi(0,9)}, \quad (19)$$

где $\psi(p)$ – квантиль, отвечающая вероятности p для величины, распределенной по стандартному нормальному закону. В силу симметрии нормального распределения $\psi(p) = -\psi(1-p)$. Значение $F_{am} + D_u$ не превышает в течение 90 % времени, поэтому оно

является верхней децилью атмосферного шума, а значение $F_{am} - D_l$ является нижней децилью и не превышает в течении 10 % времени.

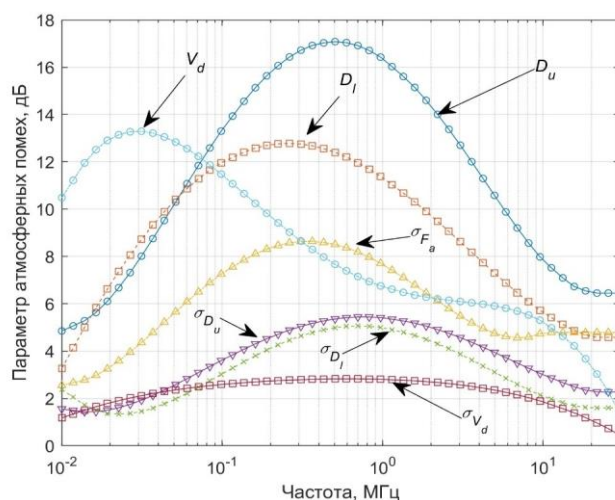


Рис. 3. Статистические параметры атмосферных помех

Квантили могут быть легко получены с помощью обратной кумулятивной функции вероятностей. Например, в табл. 1 приведены значения квантилей стандартного нормального распределения для некоторых вероятностей [17].

Таблица 1 – Квантили стандартного нормального распределения

p	0,5	0,6	0,7	0,8	0,90	0,95	0,99	0,999
$\psi(p)$	0	0,253	0,524	0,841	1,282	1,645	2,326	3,090

Кумулятивные функции распределения и функции распределения плотности вероятности F_a показаны на рис. 4.

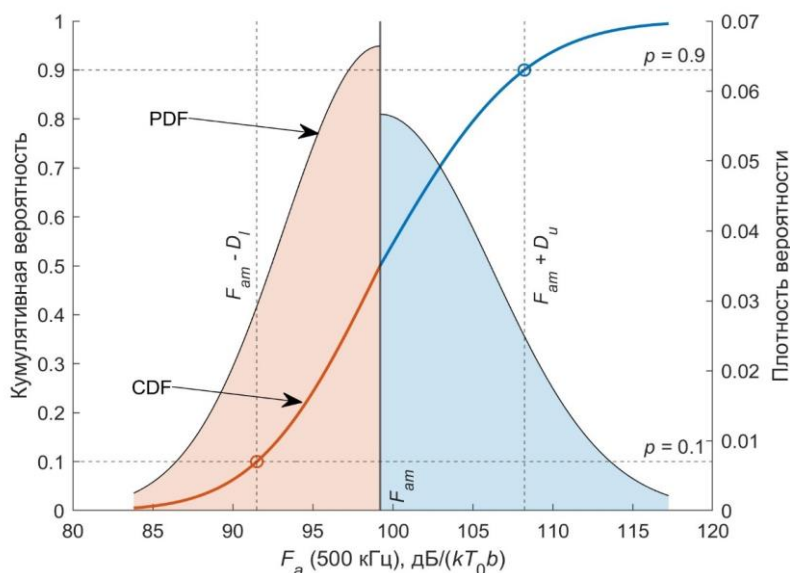


Рис. 4. Распределение вероятностей F_a , лето, 20:00–24:00, Боулдер (США) (40,02° с. ш., 105,28° з. д.)

Так как аппроксимационные функции для статистических параметров определены для времени LT и соответствующих сезонов года, различающихся в северном и южном полушариях, то целесообразно привести статистические параметры к единому времени UTC и выполнить интерполяцию значений в экваториальной полосе. Указанные операции продемонстрированы на рис. 5 на примере параметров $D_{0,8}$ и $D_{0,2}$, где индексами обозначены вероятности того, что помеха не превысит уровень $F_{am} + D$ при $p \geq 0,5$ и $F_{am} - D$ при $p < 0,5$.

Из рисунка можно видеть недостаток сезонного подхода к определению параметра D – значения параметра существенно различаются в северном и южном полушариях.

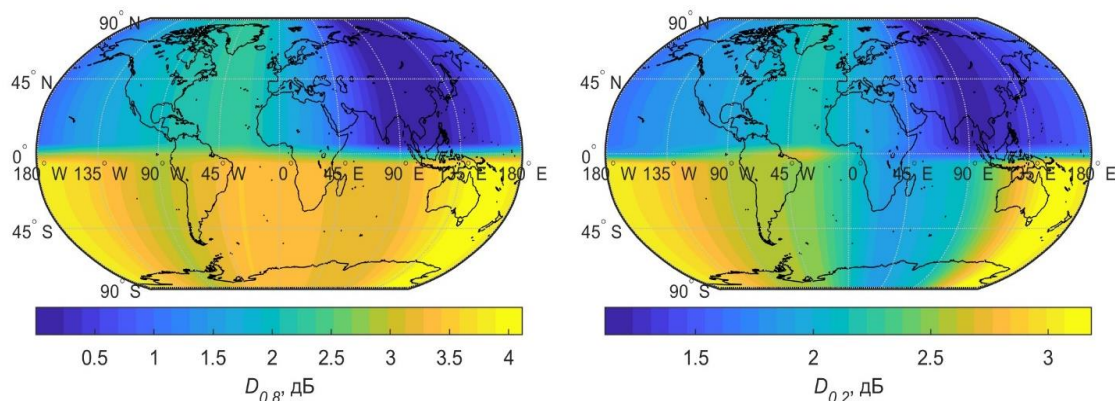


Рис. 5. Карты параметра D на заданном уровне вероятности: $p = 0,8$ (слева), $p = 0,2$ (справа); январь, 4:00 UTC, $f = 10$ кГц

Модели промышленных и галактических помех

В соответствии с рекомендацией [2] промышленные помехи вне зданий и промышленных объектов и галактические помехи имеют характеристики, близкие к аддитивному белому гауссовскому шуму и аппроксимируются выражением

$$F_{mm} = c - d \lg f, \quad (20)$$

где f – частота, МГц, а c и d – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2 [2].

Таблица 2 – Категории помех и коэффициенты аппроксимации

Обозначение	Категория помех	Коэффициент c	Коэффициент d
A	Индустриальные (город, деловой район)	76,8	27,7
B	Индустриальные (город, жилой район)	72,5	27,7
C	Индустриальные (сельская местность)	67,2	27,7
D	Индустриальные (малонаселенная сельская местность)	53,6	28,6
E	Галактические	52,0	23,0

Выражение (20) для категорий A–C справедливо в диапазоне частот от 0,3 до 250 МГц, в то время как для категории D только в диапазоне 0,3–30 МГц. Галактические помехи (категория E) рассматриваются только выше 10 МГц. Графики медианных значений коэффициентов помех для категорий A–E показаны на рис. 6.

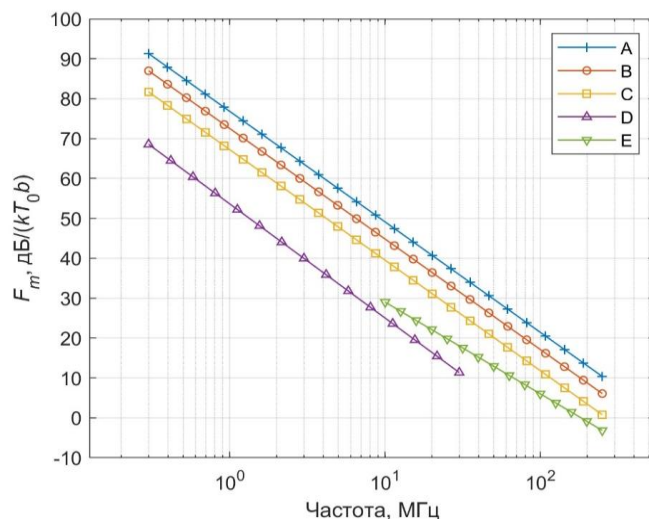


Рис. 6. Графики медианных значений коэффициентов помех для категорий A–E

Суммирование помех

Если в диапазоне низких и очень низких частот преобладают атмосферные помехи, то в диапазоне высоких частот величины атмосферных, промышленных и галактических помех сравнимы по величине. В этом случае медианное значение коэффициента шума и его СКО в дБ вычисляются по формулам:

$$F_{mT} = c \left(\ln(\alpha_T) - \frac{\sigma_T^2}{2c^2} \right); \quad (21)$$

$$\sigma_T = c \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\beta_T}{\alpha_T^2} \right)}, \quad (22)$$

где

$$c = \frac{10}{\ln 10} = 4,343; \quad (23)$$

$$\alpha_T = \sum_{i=1}^n \alpha_i = \sum_{i=1}^n \exp \left(\frac{F_{mi}}{c} + \frac{\sigma_i^2}{2c^2} \right) [\text{Вт}]; \quad (24)$$

$$\beta_T = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \left(\exp \left(\frac{\sigma_i^2}{c^2} \right) - 1 \right) [\text{Вт}^2]. \quad (25)$$

В выражениях (24)–(25) F_{mi} и σ_i обозначают медианное значение и СКО коэффициентов шума соответствующих помеховых компонентов (атмосферного, промышленного и галактического). Для вычисления α_T и β_T в формулы (24)–(25) необходимо подставить σ_i из нижней и верхней частей распределения соответствующих компонентов помех. Поэтому в результате должно получиться два СКО для нижней и верхней частей распределения суммарной помехи σ_{iT} и σ_{uT} , тогда нижняя и верхняя децили суммарной помехи вычисляются как

$$D_{uT} = \psi(0,9) \sigma_{uT} = 1,282 \sigma_{uT}; \quad (26)$$

$$D_{iT} = -\psi(0,1) \sigma_{iT} = 1,282 \sigma_{iT}. \quad (27)$$

Аналогично из формулы (21) с помощью выражений (22)–(25) можно получить два значения F_{mT} , одно из них F_{mIT} – с помощью параметров нижних частей распределений компонентов помех, а второе F_{mUT} – с помощью параметров верхних частей распределений. Очевидно, что эти два значения F_{mT} практически во всех случаях не будут совпадать, поэтому необходим рациональный способ выбора одного значения из двух найденных. Одним из вариантов является выбор наибольшего значения F_{mT} , так как это дает наибольшее значение мощности помехи на выходе приемной антенны, т. е. соответствует наихудшим условиям приема радиосигнала.

Если значение D_{ui} одного из компонентов помех превышает значение 12 дБ, то σ_{uT} не должно превышать значения

$$\sigma_T = c \sqrt{2 \ln \left(\frac{\alpha_T}{\gamma_T} \right)}, \quad (28)$$

где

$$\gamma_T = \sum_{i=1}^n \exp \left(\frac{F_{mi}}{c} \right), \quad (29)$$

С помощью (28) аналогично ограничивается максимальное значение величины σ_{iT} .

Методика прогнозирования непреднамеренных помех и ее реализация в среде моделирования Matlab

В интересах прогнозирования уровней непреднамеренных помех разработана методика прогнозирования непреднамеренных помех, реализованная в виде пакета расширения *mRNoise* для среды моделирования *Matlab*.

Вычислительным ядром пакета являются интерполяционные объекты. Интерполяционный объект $F1$ базируется на совокупности данных, полученных с помощью выражений (3)–(8) и позволяет получить медианное значение коэффициента атмосферных помех на частоте 1 МГц для заданных в виде многомерных матриц параметров $\{m, h, lat, lon\}$. Интерполяционный объект $F2$ базируется на выражениях вида (9)–(10) и обеспечивает приведение медианного коэффициента атмосферных помех к заданной частоте. В качестве входных данных необходимо использовать полученный с помощью интерполятора $F1$ массив значений F_{am} (1 МГц) и матрицы параметров $\{m, h, lg f\}$. Объекты $F1$ и $F2$ используют линейную интерполяцию и линейную экстраполяцию (для частотной зависимости – логарифмическую), что позволяет использовать их за пределами диапазона 0,01–20 МГц. Однако следует помнить, что экстраполированные значения могут не соответствовать реальным уровням помех, поэтому их следует использовать с осторожностью.

Интерполяционные объекты $FDuA$, $FDIA$, $FsigmaFaA$, $FsigmaDuA$, $FsigmaDIA$, FV_d и $Fsigma_V_d$ необходимы для получения параметров D_u , D_l , σ_{F_a} , σ_{D_u} , σ_{D_l} , V_d и σ_{V_d} соответственно. Входными данными для этих интерполяторов служат матрицы параметров $\{m, h, lg f\}$. Интерполяционные объекты используют линейную интерполяцию (для частотной зависимости – логарифмическую) и экстраполяцию методом «ближайшего соседа».

Для практического использования созданы функции $NoiseFam$ и $DParam1$, которые позволяют получить карты медианного коэффициента шума F_{am} , приведенного к заданной частоте f , и параметра D с заданной вероятностью превышения уровня помехи p . Функции $NoiseFam$ и $DParam$ могут генерировать данные, аналогичные показанным на рис. 2 и 5 соответственно. С помощью опциональных аргументов доступны интерполяция выходных параметров в экваториальной полосе установленной ширины и приведение к времени UTC.

Для прогнозирования внутрисуточных изменений параметров F_{am} и D разработаны функции $NoiseFamPoint$ и $DParam$, которые позволяют строить временные графики величин F_{am} и D для точки с заданными координатами. Поскольку базовые интерполяторы $F1$, $F2$, $FDuA$ и $FDIA$ осуществляют линейную интерполяцию, то указанные функции вычисляют искомые значения для временных отсчетов, соответствующих средним точкам шести временных блоков в соответствии с рекомендацией [2], для остальных временных точек выполняется сплайн-интерполяция. Функции $NoiseFamPoint$ и $DParam$ могут быть использованы для получения данных, аналогичных показанным на рис. 3.

Характеристики индустриального и галактического компонентов помех вычисляются с помощью функции $NoiseMG$. Функции $NoiseFam$, $DParam1$ и $NoiseMG$ используются функцией $NoiseTotal$ для определения суммарной помехи с учетом выражений (21)–(29). Мощность суммарной помехи, дБ/Вт, и среднеквадратичное значение напряженности электрического поля помех, дБ/(мкВ/м), вычисляются в соответствии с выражениями (1) и (2) с помощью функции $NoisePwr$. Функции $NoisePwrPoint$ и $NoiseTotalPoint$ предназначены для вычисления тех же характеристик, что и функции $NoisePwr$ и $NoiseTotal$. Данные функции аналогично функции $NoiseFamPoint$, позволяют получать сглаженные сплайн-интерполяцией суточных прогнозов помеховых характеристик в заданной географической точке.

Блок-схема методики для выполнения пространственных вычислений показана на рис. 7.

Как видно из рисунка для вычисления мощности помех в блоке 1 сначала необходимо ввести исходные данные, такие как месяц года m , время суток h , широту lat , долготу lon и рабочую частоту $freq$. Эти переменные вводятся в так называемом формате *full grid*, т. е. представляют собой матрицы размера $[a \times b]$, где a и b – количество дискретов широты и долготы соответственно. Вероятность превышения заданного уровня помехи p , ширина полосы интерполяции в экваториальной зоне $IntSz$, категория помеховой обстановки для индустриальных помех env и ширина рабочей полосы частот $bandwidth$ вводятся в виде скалярных переменных. Переменная $fpath$ является строковой и указывает путь к файлу с интерполяционными объектами.

Далее в блоке 2 загружаются интерполяционные объекты. После чего вызывается главная функция *NoisePwr*, которая проводит пространственные вычисления суммарной мощности помех и суммарной напряженности поля помех. Для проведения вычислений вызывается вспомогательная функция *NoiseTotal* (блок 3), которая осуществляет суммирование компонентов помех в соответствии с выражениями (21)–(29). Указанная функция может быть использована самостоятельно, тогда она возвращает структуру *NStruct* с полями *FmT* – медианное значение суммарного коэффициента помех, *DlT* – нижняя дециль суммарного коэффициента помех, *DuT* – верхняя дециль суммарного коэффициента помех, а также аналогичные поля для каждого из компонентов помех (атмосферного, галактического и индустриального).

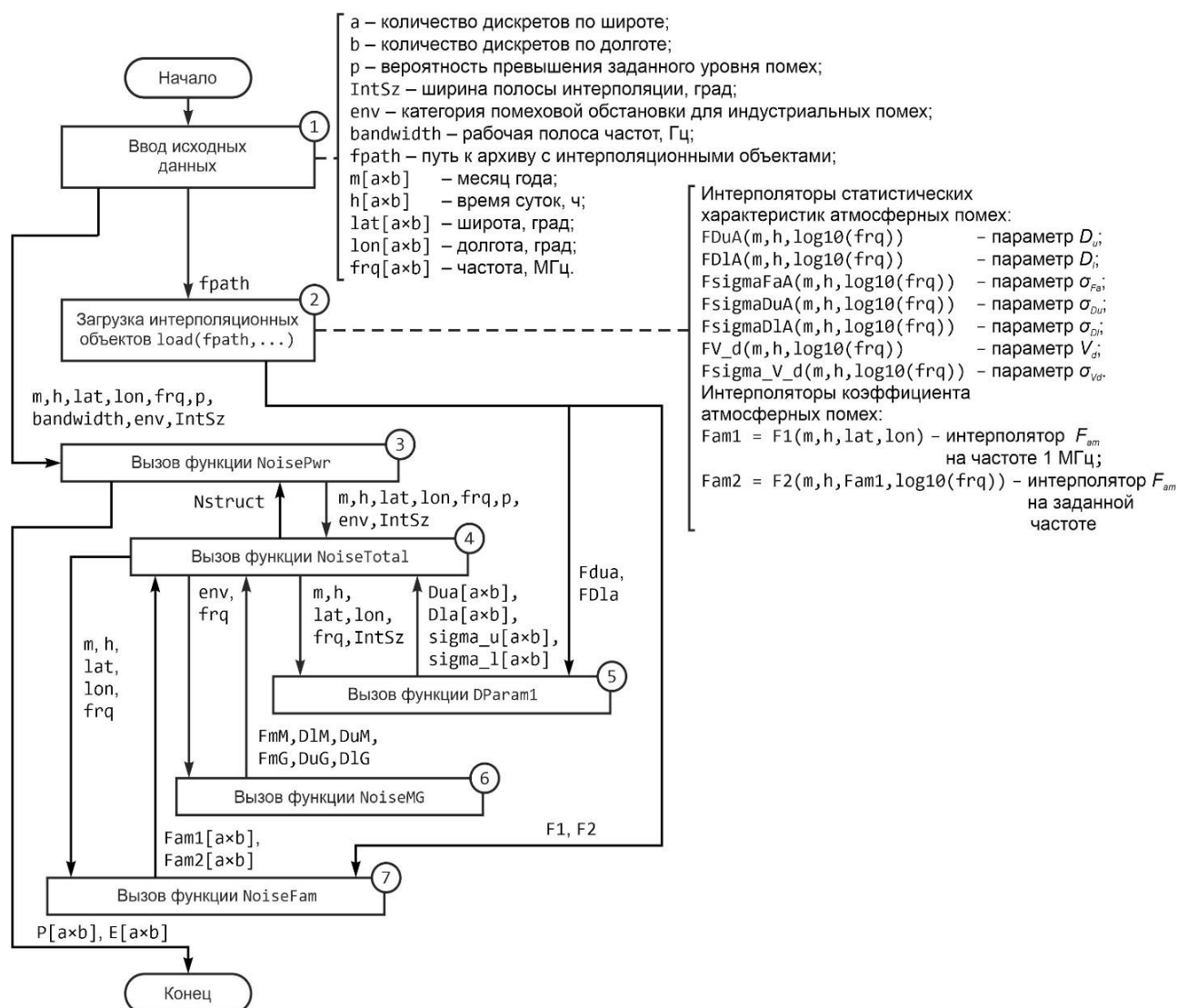


Рис. 7. Блок-схема методики прогнозирования непреднамеренных помех в случае выполнения пространственных вычислений

В свою очередь медианный коэффициент атмосферных помех, приведенный к заданной частоте, вычисляется путем вызова функции *NoiseFam* (блок 7), а параметры D_u , D_l , σ_{D_u} и σ_{D_l} для атмосферного компонента – с помощью функции *DParam1* (блок 5). Медианные значения коэффициентов галактических и индустриальных помех, а также их нижние и верхние децили рассчитываются с помощью функции *NoiseMG*. Функциональные различия программных реализаций рекомендаций ITU приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Функциональные различия программных реализаций рекомендации ITU-R P.372

Программная реализация	ITUnoise	GHNoise	mRNoise
Перечень вычисляемых параметров	Кроме P_n, E_n, V_d и σ_{V_d}	Кроме V_d, σ_{V_d} и статистики компонентов	Полный
Учитываемые компоненты	Все	Все	Все
Способ вычислений	Только в точке	В точке и по всей поверхности Земли	В точке и по заданному району
Приведение к заданному времени	Только UTC	Только LT	UTC и LT
Учет вероятности превышения уровня помех при вычислении P_n и E_n	Нет	Только медианное значение	Да
Экваториальная интерполяция	Нет	Да, полоса фиксирована	Да, полоса регулируется
Интерполяция по времени суток и месяцу года	Только по времени суток	Нет	Да

Проверка адекватности разработанной методики

В низкочастотных диапазонах атмосферные помехи часто являются доминирующим видом помех [18], поэтому имеет смысл проверить соответствие прогнозируемых уровней помех по результатам расчетов различными способами. В качестве одного из таких альтернативных способов взят графический способ определения параметров атмосферных помех. В табл. 4 приведены результаты расчетов для г. Боулдер (США), г. Женева (Швейцария), г. Канберра (Австралия) и г. Рио Гранде (Аргентина) выполненные ручным способом по графикам и с помощью ЭВМ. Графические примеры приведены в документах № 1 – в [10], № 2 – в [19]. Примеры № 3 и № 4 выполнены графическим способом по рекомендации [2].

Таблица 4 – Результаты определения статистических параметров коэффициента шума с помощью графического и вычислительного методов

Метод	Параметр					
	F_{am} (1 МГц), дБ/(kT ₀ b)	F_{am} приведенный к частоте f , дБ/(kT ₀ b)	D_u , дБ	D_b , дБ	σ_{D_u} , дБ	σ_{D_b} , дБ
1. Боулдер (США), 40,02° с.ш., 105,28° з.д., лето, 20:00–24:00, $f = 500$ кГц						
Графический	90,00	102,00	9,00	7,70	3,10	2,00
Вычислительный	87,73	99,19	9,02	7,70	3,07	2,12
Разница	2,27	2,81	0,02	0,00	0,03	0,12
2. Женева (Швейцария), 46,20° с.ш., 6,15° в.д., лето, 20:00–24:00, $f = 50$ кГц						
Графический	78,00	135,00	6,40	6,00	1,90	2,00
Вычислительный	71,94	132,00	6,38	6,01	1,86	2,02
Разница	6,06	3,00	0,02	0,01	0,04	0,02
3. Канберра (Австралия), 35,30° ю.ш., 149,13° в.д., зима, 08:00–12:00, $f = 5$ МГц						
Графический	35,00	24,00	11,10	7,40	3,90	3,20
Вычислительный	35,14	19,95	10,56	7,29	3,94	3,11
Разница	0,14	0,43	0,54	0,11	0,06	0,09
4. Рио Гранде (Аргентина), 53,78° ю.ш., 67,70° з.д., осень, 16:00–20:00, $f = 15$ МГц						
Графический	51,00	27,00	7,50	6,00	2,40	2,00
Вычислительный	52,45	27,35	7,71	6,32	2,44	1,95
Разница	1,45	0,35	0,21	0,32	0,04	0,05

Как видно из таблицы максимальная погрешность ручного способа относительно вычислительного для примера № 2 составляет 6,06 дБ. Однако, это можно объяснить уточнением с момента издания рекомендации [19] долготных и широтных коэффициентов, необходимых для аппроксимации параметра F_{am} конечными тригонометрическими рядами. Для последней редакции рекомендации МСЭ [2] наблюдается расхождение результатов не более 1,5 дБ (примеры № 3 и № 4), что вполне объяснимо погрешностью ручного определения параметра F_{am} по картам крупного масштаба. Для более детального установления соответствия разработанной методики рекомендациям МСЭ [2] проведено сравнение цифровых

карт медианного значения эффективного коэффициента шума F_{am} . Расчеты выполнены тремя разными способами: с помощью разработанного пакета *mRNoise* и с помощью программ *GH_Noise* [5] и *ITURNNoise* [4]. Условия – время 14:00 LT, сезон – зима, рабочая частота 20 МГц. МО и СКО различий прогнозов приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Статистические характеристики различий прогнозов

Параметр	ΔF_{am} (mRNoise – GH_Noise)	ΔF_{am} (mRNoise – ITURNNoise)
МО	–0,23	0,30
СКО	1,11	1,76

Из таблицы видно, что результаты прогнозирования в пакете *mRNoise* по всей поверхности Земли хорошо согласуются с результатами программ *GH_Noise* и *ITURNNoise*. Также для результатов прогнозирования в программах *GH_Noise* и *mRNoise* наблюдается хорошее совпадение уровней медианной мощности. Например, для условий 18.00 LT, весна, $b = 1$ Гц МО различий равно 0,0176 дБ, а СКО составляет 0,0247 дБ.

Следует отметить, что в программе *GH_Noise* не осуществляется интерполяция по времени и месяцу года, а в программе *ITURNNoise* данные интерполируются только по времени, поэтому целесообразно проверить различия расчетов для случайных данных, чтобы выявить влияние интерполяции на результат прогнозирования. Для этого сгенерирован массив из 100 случайных точек в пространстве переменных $m \in [0; 12]$, $h \in [0; 24]$ (ч), $env \in \{1; 2; 3; 4\}$, $lat \in [-90; 90]$ (град), $lon \in [-180; 180]$ (град), $f \in [0,01; 30]$ (МГц), где env – переменная, характеризующая категории помех A–D соответственно (см. табл. 2). Все переменные распределены равномерно, за исключением частоты f , которая распределена логарифмически равномерно на заданном отрезке. Данные поданы на вход *ITURNNoise* и *mRNoise* и получены значения суммарного медианного коэффициента шума F_{mT} . Гистограмма различий результатов расчетов параметра F_{mT} показана на рис. 8. Получить аналогичные результаты в программе *GH_Noise* не представляется возможным, так как в ней реализован только ручной ввод исходных данных в графическом интерфейсе, скомпилированной библиотеки или консольного ввода в *GH_Noise* нет.

Как видно из рисунка 80 % различий лежат в пределах от –2 до 1,5 дБ, но некоторые значения F_{mT} различаются весьма значительно – до 12 дБ. Поэтому выбраны 6 наиболее существенно отличающихся позиций параметра F_{mT} ($|\Delta F_{mT}| > 4$ дБ), которые можно считать выбросами. Соответствующие выбросам исходные данные вручную введены в *GH_Noise*. Результаты показаны в табл. 6.

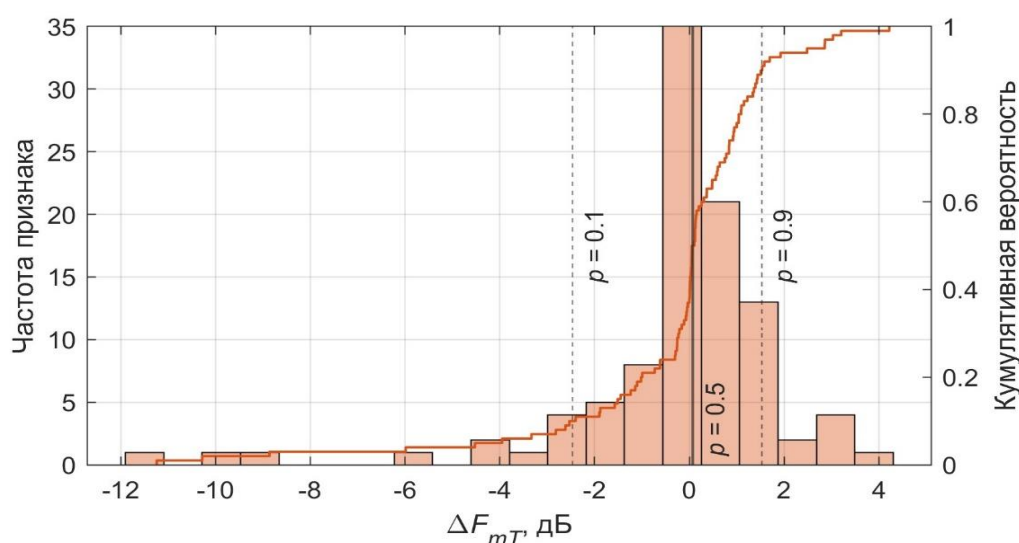


Рис. 8. Гистограмма различий параметра F_{mT} , полученного в программе *ITURNNoise* и пакете *mRNoise* с помощью случайных входных данных

Из таблицы видно, что МО и СКО различий прогнозирования имеют одинаковый порядок. Если для узловых точек (точек, где интерполяция не применяется) различия прогнозирования несущественны (см. табл. 5), то для промежуточных точек полученные различия могут быть объяснены разными интерполяционными методами. В пакете *mRNoise* применена многомерная линейная интерполяция для пространственной вариации и сплайн-интерполяция для внутрисуточной вариации коэффициента атмосферных помех. В программе *ITURNNoise* интерполяция выполняется только для времени суток с помощью выражения

$$10^{F_{am1}/10} + s(10^{F_{am2}/10} - 10^{F_{am1}/10}), \quad (30)$$

Таблица 6 – Выбросы разницы прогнозирования с исходными данными

Параметр	Номер прогноза					
	2	7	30	32	46	80
(<i>mRNoise</i>), дБ/(kT ₀ b)	89,68	100,53	131,90	99,03	115,87	74,91
(<i>ITURNNoise</i>), дБ/(kT ₀ b)	99,96	106,52	127,69	107,89	120,39	86,16
(<i>GH_Noise</i>), дБ/(kT ₀ b)	89,66	99,23	129,84	108,45	119,20	81,67
lat, град	20,31	–12,98	37,00	–19,81	30,81	–10,68
lon, град	–86,35	–27,05	–84,65	–22,92	–97,91	–50,27
Время, UTC, ч	17	11	10	18	18	14
Время, LT, ч	11,24	9,20	4,35	16,47	11,47	10,65
Соответствующий временной блок LT (для <i>GH_Noise</i>)	08:00–12:00	08:00–12:00	04:00–08:00	16:00–20:00	08:00–12:00	08:00–12:00
Помеховое окружение	3	4	3	4	4	3
Месяц	6	1	2	5	11	11
Сезон (для <i>GH_Noise</i>)	Лето	Зима	Зима	Весна	Осень	Осень
f, МГц	0,32	0,09	0,04	0,15	0,06	0,86

Средняя разница прогнозов по выбросам ΔF_{mT1} (*mRNoise* – *ITURNNoise*) и ΔF_{mT2} (*mRNoise* – *GH_Noise*) и СКО показаны в табл. 7.

Таблица 7 – Статистические характеристики различий прогнозирования по выбросам

Параметр	МО	СКО
ΔF_{mT1}	–6,20	5,64
ΔF_{mT2}	–2,68	4,65

где F_{am1} и F_{am2} – коэффициенты атмосферных помех, полученные для смежных временных блоков, и s – коэффициент интерполяции, зависящий от часа внутри текущего временного блока. В *GH_Noise* интерполяция для времени суток и месяца года не предусмотрена.

Выводы

Разработана усовершенствованная методика прогнозирования непреднамеренных помех в диапазоне 0,01–30 МГц и соответствующая программная реализация в виде пакета расширения *mRNoise* [20] для среды моделирования *Matlab*.

Разработанный программный пакет обладает более широкими функциональными возможностями по сравнению с известными программами *GH_Noise* и *ITURNNoise*. В частности, он позволяет выполнять приведение карт помеховых характеристик к единому времени UTC, осуществляет линейную интерполяцию значений по месяцам года и по времени суток при проведении пространственных расчетов, а при расчетах внутрисуточных изменений помеховых характеристик выполняет сплайн-интерполяцию промежуточных значений. Полное сравнение программной реализации рекомендации МСЭ [2] приведено в табл. 3.

В целом результаты прогнозирования уровней непреднамеренных помех с помощью методик, реализованных в программах *GH_Noise*, *ITURNoise* и пакете расширения *mRNoise*, соответствуют друг другу. Различия в прогнозировании для узловых точек незначительны, а существенные различия для промежуточных значений исходных данных объясняются разницей методов интерполяции. Следовательно, разработанную методику прогнозирования непреднамеренных помех, реализованную в пакете расширения *mRNoise* для среды моделирования *Matlab* можно признать адекватной и в дальнейшем использовать ее при прогнозировании зон обеспечения связью как подвижных, так и стационарных абонентов в любой точке земного пространства.

Литература

1. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. СПб.: Научно-технические технологии, 2020. 337 с.
2. ITU-R Recommendation P.372-17. Radio Noise. ITU, 2024.
3. Пашинцев В. П., Гринев Е. М., Коваль С. А., Скорик А. Д. Методика определения частотной зависимости напряженности поля помех и надежности декаметрового радиосвязи в различные сезоны года // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 61-79. DOI:10.24412/2410-9916-2022-2-61-79.
4. ITU-R-HF v.14.3. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/ITU-R-Study-Group-3/ITU-R-HF/releases/tag/v14.3> (дата обращения: 15.10.2024).
5. Spaulding A. D., Stewart F. G. An updated noise model for use in IONCAP. NTIA Report 87-212. NTIA/ITS, 1987. 151 p.
6. Типикин А. А. Методика расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне очень низких частот на основе скачкового метода // Информационно-управляющие системы. 2023. № 5. С. 12-21. DOI:10.31799/1684-8853-2023-5-12-21. EDN: FTXMCY.
7. Типикин А. А., Пахотин В. А. Методика расчета суммарного поля пространственной и земной волн диапазона очень низких частот // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 3. С. 1-21. DOI:10.24412/2410-9916-2024-3-001-021.
8. Robinson F. N. H. Noise in Electrical Circuits. Creative Media Partners, LLC, 2021. 136 p.
9. Ковалгин Ю. А., Сантуш В. Учет уровня шума на частотах ниже 30 МГц при расчете зон обслуживания DRM-передатчиков // Информация и космос. 2019. № 1. С. 11-21.
10. Spaulding A. D., Washburn J. S. Atmospheric Radio Noise: Worldwide Levels and Other Characteristics. Report 85-173. NTIA, 1985. 143 p.
11. Fieve S., Portala P., Bertel L. A new VLF/LF atmospheric noise model // Radio Science. 2007. Vol. 42 (RS3009). P. 1-14. DOI:10.1029/2006RS003513.
12. Lucas D. L., Harper J. D. A Numerical Representation of CCIR Report 322 High Frequency (3-30 MC/s) Atmospheric Radio Noise Data. Technical Note 318. National Bureau of Standards, 1965. 164 p.
13. Варламов О. В., Варламов В. О. Распределение максимальных уровней атмосферных радиопомех низких частот и средних частот по поверхности Земли // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 42-51.
14. Волков Ю. С. Сходимость процессов сплайн-интерполяции и обусловленность систем уравнений построения сплайнов // Математический сборник. 2019. Т. 210. № 4. С. 87-102.
15. Кузьмин И. И. Работа с данными в статистических исследованиях // Восточно-европейский научный журнал. 2021. № 7-1(71). С. 36-39. DOI:10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.71.82.
16. Бессонов А. А. Искусственный интеллект и математическая статистика в криминалистическом изучении преступлений. Монография. М.: Проспект, 2021. 816 с.
17. Veloni A., Miridakis N., Boukouvala E. Digital and Statistical Signal Processing. Boca Raton: CRC Press, 2018. 576 p. DOI:10.1201/9780429507526.
18. Акулов В. С., Мирошников В. И., Талагаев В. И., Угрик Л. Н. Прогнозирование излученной мощности для обеспечения связи на сверхдлинных волнах // Техника средств связи. 2023. № 1(161). С. 13-18. DOI:10.24412/2782-2141-2023-1-13-18.
19. World Distribution and Characteristics of Atmospheric Radio Noise. Report 322 // Documents of the Xth Plenary Assembly. Geneva: CCIR, 1963.
20. Tipikin A. A. mRNoise. Radio noise model based on ITU-R P.372 Recommendation [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/AlexT1983/mRNoise> (дата обращения: 12.12.2024).

References

1. Makarenko S. I. *Modeli sistemy svyazi v usloviakh prednamerennykh destabilizirujushchikh vozdustvii i vedeniya razvedki* [Telecommunication systems model in operating conditions of intended interference and reconnaissance. Monograph]. St.-Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020. 337 p. (In Russian).
2. ITU-R Recommendation P.372-17. Radio Noise. ITU, 2024.
3. Pashintsev V. P., Grinev E. M., Koval S. A., Skorik A. D. *Metodika opredeleniya chastotnoi zavisimosti napriazh napriazhennosti polia pomekh i nadezhnosti dekametrovoi svyazi v razlichnye sezony goda* [Method for determining the frequency dependence of the strength of the interference field and the reliability of decameter communication in different seasons of the year]. Systems of Control, Communication and Security. 2022. No. 2. Pp. 61-79. (In Russian). DOI:10.24412/2410-9916-2022-2-61-79.
4. ITU-R-HF v.14.3. Available at: <https://github.com/ITU-R-Study-Group-3/ITU-R-HF/releases/tag/v14.3> (accessed 15 October 2024).
5. Spaulding A. D., Stewart F. G. *An updated noise model for use in IONCAP. NTIA Report 87-212*. NTIA/ITS, 1987. 151 p.
6. Tipikin A. A. *Metodika rascheta napriazhennosti polia ionosfernoi volny v diapazone ochen' nizkikh chastot na osnove skachkovogo metoda* [The Technique of Calculating the Field Strength of the Ionospheric Wave in the Very Low Frequency Band Based on the Wavehop Method]. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]. 2023. No. 5. Pp. 12-21. (In Russian). DOI:10.31799/1684-8853-2023-5-12-21. EDN: FTXMCY.
7. Tipikin A. A., Pakhotin V. A. *Metodika rascheta summarnogo polia prostranstvennoi i zemnoi voln diapazona ochen' nizkikh chastot* [The Technique of Calculating the Total Field of Spatial and Ground Waves in the Very Low Frequency Band]. Systems of Control, Communication and Security. 2024. No. 3. Pp. 1-21. (In Russian). DOI:10.24412/2410-9916-2024-3-001-021.
8. Robinson F. N. H. *Noise in Electrical Circuits*. Creative Media Partners, LLC, 2021. 136 p.
9. Kovalgin Yu. A., Santos V. Taking into account the noise level at frequencies below 30 MHz when designing maintenance areas of DRM-transmitters. *Information and Space*. 2019. No. 1. Pp. 11-21. (In Russian).
10. Spaulding A. D., Washburn J. S. *Atmospheric Radio Noise: Worldwide Levels and Other Characteristics. Report 85-173*. NTIA, 1985. 143 p.
11. Fieve S., Portala P., Bertel L. A new VLF/LF atmospheric noise model. *Radio Science*. 2007. Vol. 42 (RS3009). P. 1-14. DOI:10.1029/2006RS003513.
12. Lucas D. L., Harper J. D. *A Numerical Representation of CCIR Report 322 High Frequency (3-30 MC/s) Atmospheric Radio Noise Data. Technical Note 318*. National Bureau of Standards, 1965. 164 p.
13. Varlamov O. V., Varlamov V. O. *Raspredelenie maksimal'nykh urovnei atmosferykh radioshumov nizkikh chastot i srednikh chastot po poverkhnosti Zemli* [Distribution of maximum levels of atmospheric radio noise in LF and MF ranges in the territory of the Earth]. H&ES Research. 2017. V. 9. No. 5. Pp. 42-51. (In Russian).
14. Volkov Yu. S. *Skhodimost' protsessov splain-interpoliatsii i obuslovlennost' sistem uravnenii postroeniya splainov* [Spline interpolation process convergence and spline construction equations system conditionality]. Matematicheskii sbornik. 2019. Vol. 210. No. 4. Pp. 87-102. (In Russian).
15. Kuzmin I. I. *Rabota s dannymi v statisticheskikh issledovaniyakh* [Working with data in statistical research]. East European Scientific Journal. 2021. No. 7-1(71). Pp. 36-39. (In Russian). DOI:10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.71.82.
16. Bessonov A. A. *Iskusstvennyy intellekt i matematicheskaya statistika v kriminalisticheskoy izuchenii prestuplenij. Monografija* [Artificial Intelligence and Mathematical Statistics for The Crime Analysis. Monograph]. Prospekt, 2021. 816 p. (In Russian).
17. Veloni A., Miridakis N., Boukouvala E. *Digital and Statistical Signal Processing*. Boca Raton: CRC Press, 2018. 576 p. DOI:10.1201/9780429507526.
18. Akulov V. S., Miroshnikov V. I., Talagaev V. I., Ugrik L. N. Forecasting of the radiated power for the ensuring communication on superlong waves. *Means of Communication Equipment*. 2023. No. 1 (161). Pp. 13-18. (In Russian). DOI:10.24412/2782-2141-2023-1-13-18.
19. *World Distribution and Characteristics of Atmospheric Radio Noise. Report 322*. Documents of the Xth Plenary Assembly. Geneva: CCIR, 1963.
20. Tipikin A. A. mRNoise. Radio noise model based on ITU-R P.372 Recommendation. Available at: <https://github.com/AlexT1983/mRNoise> (accessed 12 December 2024).

Статья поступила 23 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Типикин Алексей Алексеевич – кандидат технических наук. Начальник отдела. Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия». Область научных интересов: распространение радиоволн СДВ, ДВ, КВ диапазонов, антенно-фидерная техника. Тел.: +7 981 940 54 15. E-mail: alextip@mail.ru. Адрес: 198516, Россия, г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Разводная, д. 17.

Густов Александр Александрович – доктор военных наук, профессор. Заместитель директора научно-исследовательского центра по научной работе. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7 911 917 47 15. E-mail: a.gustov@inteltech.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Radio noise forecasting technique in 0,01–30 MHz frequency band and its software implementation

A. A. Tipikin, A. A. Gustov

Annotation. Problem statement: stationary and mobile users telecommunication capabilities in specified region depend on available signal to noise ratio. In case of interference absence noises, including several components, become the one of the main factors of quality of service decreasing. There are some techniques and appropriate software implementations, based on International Telecommunication Union recommendations, that gives possibility to forecast noise level. But disadvantages of the existing techniques in some cases make difficult to forecast noise level without software or technique modification. **The purpose of the work** is to develop technique of noise forecasting in 0,01–30 MHz frequency band and appropriate software implementation, that eliminates disadvantages of existing methodology and enables subsequent estimation of the radio links quality of service in specified region. **Methods:** we used system approach to summarize results of noise forecasting methodology research. Noise forecasting technique and its software implementation development based on system analysis provides compatibility with some methods of radio tracks energy parameters forecasting. **Novelty:** developed technique and its software implementation provide elimination of transequatorial discontinuity of atmospheric noise parameters due to seasonal approximation functions differences, that approximate noise figure on the specified frequency; reduction of noise parameters maps to the universal coordinated time; accounting of the specified noise level exceedance possibility in calculations of noise power and noise E-field and some other minor modifications. **Practical relevance:** technique implemented as mRNoise expansion package for Matlab modelling software. Expansion package mRNoise available on open resources such as Matlab-Central and GitHub. Noise power and E-field calculations appear as required data for the quality of service estimation in specified region.

Keywords: amplitude probability distribution, atmospheric interference, galactic interference, industrial interference, exceeding the preset interference level, effective noise factor.

Information about Authors

Tipikin Aleksey Alekseevich – candidate of engineering sciences. Division head. Military Educational and Scientific Center of the Navy «Naval Academy». Field of research: VLF, LF and HF radio waves propagation, antenna-feeder devices. Тел.: +7 981 940 54 15. E-mail: alextip@mail.ru

Address: 198516, Russia, Saint-Petersburg, Peterhof, Razvodnaya str., 17.

Gustov Alexander Alexandrovich – Doctor of Military Sciences, Professor. Deputy Director of the Research Center for Scientific work. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Тел.: +7 911 917 47 15. E-mail: a.gustov@inteltech.ru

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

Для цитирования: Типикин А. А., Густов А. А. Методика прогнозирования непреднамеренных радиопомех в диапазоне 0,01–30 МГц и ее программная реализация // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 33–48. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-33-48

For citation: Tipikin A. A., Gustov A. A. Radio noise forecasting technique in 0,01–30 MHz frequency band and its software implementation. Means of Communication Equipment. 2025. No 1 (169). Pp. 33–48. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-33-48

УДК 623.5

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-49-56

Методика прогнозирования потерь техники связи в условиях деструктивных воздействий

Манилюк Е. П., Гречишникова Т. А.

Аннотация. Современные технологии связи являются неотъемлемой частью функционирования критически важных инфраструктур, однако их устойчивость к разрушительным воздействиям остается под угрозой. Традиционные методы прогнозирования потерь зачастую не учитывают специфику угроз возникновения чрезвычайных ситуаций, что делает их недостаточно эффективными в современных условиях. В этой связи разработка новых подходов к оценке вероятного ущерба для техники связи, учитывающих комплексное влияние чрезвычайных ситуаций и других деструктивных факторов, приобретает особую значимость. В данной статье представлена методика, основанная на анализе параметров техники связи, характеристик воздействий и условий эксплуатации, которая направлена на повышение точности прогнозов и укрепление устойчивости систем связи в условиях современных рисков. **Цель исследования** – разработать методику, позволяющую рассчитать прогнозируемые потери техники связи с учетом деструктивных воздействий и эксплуатационных отказов для оценки устойчивости и эффективности ее функционирования. **Научная новизна** разработанной методики в отличие от традиционных подходов, заключается в учете следующих факторов, учитывающих динамические параметры, такие как вероятность ее поражения с учетом степени защищенности и в применении технологий искусственного интеллекта для распознавания степени повреждения ТС. Интеграция новых данных заключается в использовании актуальных данных о средствах и способах применения деструктивных воздействий, тактико-технических характеристиках техники связи и условиях ее эксплуатации, а алгоритмизация процесса позволяет автоматизировать расчеты потерь техники связи и повысить точность прогнозирования. **Результаты** подтверждают возможность применения предлагаемой методики для прогнозирования потерь в условиях деструктивных воздействий, что в конечном итоге способствует повышению устойчивости систем связи, оптимизации их функционирования и своевременному принятию решений по защите и восстановлению оборудования. **Практическая значимость** разработанной методики состоит в возможности проведения расчета потерь в условиях реального времени, а также осуществления в рамках программной реализации, базирующейся на технологиях искусственного интеллекта, поддержки принятия решения должностными лицами органов технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления на восстановление повреждений техники связи.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, деструктивные воздействия, технологии искусственного интеллекта, прогноз потерь, устойчивость систем связи, эксплуатационный отказ.

Введение

Актуальность разработки методики обусловлена изменившимися военно-политическими, военно-техническими, технико-экономическими факторами и условиями, которые затрудняют применение ранее разработанных и функционирующих методик по прогнозированию потерь техники связи (ТС) в условиях деструктивных воздействий с учетом изменившихся материальных средств и способов воздействия. В современном мире обстановка изменяется очень быстро, что требует оперативного принятия решений на применение ТС. Повышение эффективности восстановления ТС осуществляется за счет снижения времени определения степеней поражения ТС. Методика прогнозирования потерь техники связи применима для расчета поврежденной ТС в чрезвычайных ситуациях как на этапе предварительного планирования для оценки потребностей и прогнозирования потерь ТС, так и на этапе непосредственно функционирования – для мониторинга потерь ТС и управления резервами. Таким образом, методика является инструментом для обеспечения устойчивости систем восстановления связи и успешного выполнения задач по функционированию ТС.

Постановка задачи на разработку методики прогнозирования потерь техники связи в результате деструктивных воздействий

Методика в реальном масштабе времени позволяет: должностным лицам органов технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) перераспределять требования к системе снабжения и восстановления, помогает эффективно организовывать восстановление ТС, обеспечивая оптимизацию выполнения их задач в рамках решения задач по диагностике поврежденной ТС. Основной целью методики является расчет прогнозируемых потерь ТС с учетом деструктивных воздействий и эксплуатационных отказов.

Предлагаемая методика направлена на решение следующих основных задач:

- расчет потерь ТС в результате деструктивных воздействий;
- обоснование требований к оперативности расчета потерь ТС в результате деструктивных воздействий;
- обоснование требований к достоверности прогноза потерь ТС в результате деструктивных воздействий;
- совместный учет результата деструктивных воздействий на ТС и эксплуатационных отказов при расчете потерь ТС на любых временных интервалах.

Сущность предлагаемой методики основывается на учете и ранжировании факторов, влияющих на количество потерь ТС, и отличается от известных тем, что впервые применяются технологии искусственного интеллекта для прогнозирования потерь ТС в чрезвычайных ситуациях. Прогнозирование потерь ТС осуществляется по двум основным направлениям:

1) Прогноз на основе анализа материальных средств деструктивных воздействий, применяемых противником;

2) Прогноз на основе анализа надежности ТС.

Расчет прогнозируемых потерь ТС в условиях деструктивных воздействий проводится с учетом: возможностей применения принципиально новых и разнообразных по своему характеру средств деструктивных воздействий, включая последствия чрезвычайных ситуаций, способных вызвать критическое повреждение или полное уничтожение техники, особенностей топологии размещения на местности ТС, возможности перемещения ТС.

Основные допущения и ограничения методики:

- вероятности определения степени повреждения ТС определяются с учетом интенсивности, продолжительности и комбинированного характера внешних воздействий;
- ТС со степенями повреждения сильные и безвозвратные потери восстанавливаются за счет снабжения;
- время восстановления ТС со слабыми повреждениями составляет до 5 суток, со средними повреждениями – 20-60 суток;
- текущий ремонт проводится на месте повреждения ТС;
- по трудоемкости восстановления эксплуатационные отказы соответствуют текущему ремонту.

При разработке методики должны быть решены следующие задачи:

- получение и предварительная обработка исходных данных;
- анализ топологии размещения ТС в современных условиях, состава и территориального размещения ремонтных органов;
- определение возможностей системы восстановления;
- формирование требований к оперативности расчета потерь ТС в условиях деструктивных воздействий;
- формирование требований к достоверности расчета потерь ТС при прогнозировании.

Таким образом, необходимо разработать методику, применение которой позволит обеспечить оперативность расчета потерь ТС при выполнении требований по достоверности такого расчета.

Получение и предварительная обработка исходных данных

Основными исходными данными методики являются:

1) Априорные данные о предполагаемой чрезвычайной ситуации:

- $T_{\text{расч.}}$ – длительность расчета;
- $P_{\text{пораж}}(t)$ – опорные вероятности определения степени повреждения ТС;
- $M_{\text{пораж}}$ – значение математического ожидания времени повреждения.

2) Априорные данные о ТС:

- N_0 – количество работоспособных ТС в начальный момент времени;
- l – расстояние между объектами ТС;
- F_h – степень защищенности.

3) Основные показатели системы восстановления:

- $t_{\text{ТР}}$ – среднее время текущего ремонта;
- $t_{\text{СР}}$ – среднее время среднего ремонта;
- $t_{\text{КР}}$ – среднее время капитального ремонта;
- T_0 – средняя наработка на отказ;
- $T_{\text{восст.}}$ – среднее время восстановления;
- $k_{\text{л/с}}$ – коэффициент обученности личного состава ремонтных подразделений;
- $k_{\text{слож.}}$ – коэффициент сложности ТС и ее ремонтпригодности;
- A – количество личного состава, задействованного для ремонта ТС;
- $T_{\text{сн}}$ – время доставки ТС со снабжения.

Состав и топология ТС берутся исходя из типовых сценариев развертывания инфраструктуры, технических характеристик оборудования, географических и климатических особенностей регионов, а также требований к пропускной способности и надежности сети.

Выходными результатами методики являются:

- $N_{\text{ДВ}}(t)$ – количество ТС, поврежденной в результате деструктивных воздействий;
- $N_{\text{ЭО}}(t)$ – количество ТС, вышедшей из строя в результате эксплуатационных отказов;
- $N_{\text{восст}}(t)$ – количество восстановленной ТС;
- $N_{\text{сн}}(t)$ – количество ТС, поступившей со снабжения;
- $P_{\text{ЭО}}(t)$ – вероятность возникновения эксплуатационных отказов ТС.

Основное содержание методики прогнозирования потерь техники связи в условиях деструктивных воздействий

Методика прогнозирования потерь техники связи в условиях деструктивных воздействий состоит из четырех этапов.

1) На первом этапе при расчете количества ТС, поврежденной в условиях деструктивных воздействий, в отличие от существующих методик, учитывается возможность перемещения техники связи и степень ее защищенности.

При расчете количества ТС, поврежденной в условиях деструктивных воздействий, учитывается первоначальное количество работоспособной ТС на исследуемый интервал времени, а также вероятность повреждения, что позволяет с большей достоверностью оценить прогнозируемые потери ТС по необходимым расчетным интервалам времени. Расчеты производятся по группам ТС. Расчет количества поврежденной ТС можно производить в любой промежуток времени, определяющим фактором является максимальная дальность полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) из состава группы технической разведки или необходимая периодичность расчета потерь ТС.

$$N_{\text{ДВ}}(t_j) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n N(t_{j-1}) \cdot P_{\text{пораж}}(t_j), \quad (1),$$

где $j \in \{1, \dots, n\}$ – номер итерации при расчете прогнозируемых потерь ТС; $k \in \{1, \dots, m\}$ – группы ТС.

В начальный момент времени $N(t_{j-1}) = N_0$, т. е. исходному количеству работоспособной ТС. Вероятность поражения ТС – зависит от уровня ее защищенности, а также от материальных средств деструктивных воздействий. Вероятность поражения ТС в зависимости от применяемого средства воздействия рассчитывается по формуле (3) и представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Вероятность определения степени повреждения техники связи

Группа ТС	Вероятность определения степени повреждения ТС	Ключевые деструктивные факторы	Характеристики воздействия
Базовые станции	0.7–0.9	– механические (обрушение, вибрация); – термические (пожар, перегрев)	Высокая интенсивность (>10 мин), комбинация с перегрузкой электросетей
Спутниковая связь	0.4–0.6	ионизирующее излучение (магнитные бури)	Продолжительное (>24 ч), низкая интенсивность, изолированное воздействие
Волоконно-оптические линии	0.5–0.7	механические (разрыв кабеля, сейсмические колебания)	Кратковременное (<5 мин), высокая интенсивность, комбинация с подтоплением
Мобильные устройства	0.3–0.5	– химическая коррозия (затопление, агрессивные среды); – электромагнитные помехи	Продолжительное (>72 ч), комбинация с температурными перепадами

$$P_{\text{пораж}}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\text{пораж}} t} \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{пораж}} = \frac{1}{T_{\text{пораж}}}$ – интенсивность повреждения ТС; $T_{\text{п}}$ – значение математического ожидания времени повреждения

Неработоспособная ТС, получившая поражение в результате деструктивных воздействий противника, распределяется по степени поражения на четыре группы:

$N_{\text{ТР}}(t_j)$ – количество ТС со слабыми повреждениями – текущий ремонт;

$N_{\text{СР}}(t_j)$ – количество ТС со средними повреждениями – средний ремонт;

$N_{\text{КР}}(t_j)$ – количество ТС с сильными повреждениями – капитальный ремонт;

$N_{\text{БП}}(t_j)$ – количество ТС, отнесенных к безвозвратным потерям.

Таким образом, количество неработоспособной ТС вследствие деструктивных воздействий рассчитывается по формуле (4):

$$N_{\text{ДВ}}(t_j) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n N_{\text{ТР}}(t_j) + N_{\text{СР}}(t_j) + N_{\text{КР}}(t_j) + N_{\text{БП}}(t_j). \quad (4)$$

2) На втором этапе происходит расчет количества неработоспособной техники связи в результате эксплуатационных отказов.

Количество неработоспособной ТС в результате возникновения эксплуатационных отказов рассчитывается по формуле (5):

$$N_{\text{отк}}(t_j) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n N(t_{j-1}) \cdot P_{\text{отк}}(t_j). \quad (5)$$

Доля эксплуатационных отказов, которые могут быть устранены личным составом ремонтных подразделений с учетом уровня обученности, рассчитывается согласно выражению (6) и табл. 3.

$$\chi = \frac{1}{n_{\text{в}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{в}}} t_{\text{в}i}, \quad (6)$$

где $t_{\text{в}i}$ – время, затрачиваемое на выполнение операций по восстановлению i -го образца ТС; $N_{\text{в}}$ – число восстановленной ТС.

Возможности ремонтных органов по восстановлению ТС со слабыми и средними повреждениями, а также ставшей в неработоспособном состоянии по причине эксплуатационных отказов определяется $N_{\text{восст}}$ – количеством восстановленной техники и рассчитывается по формуле (7):

$$N_{\text{восст}} = \frac{\tau \cdot A}{W}, \quad (7),$$

где W – предельная трудоемкость (текущий ремонт: 5-7/сут., средний ремонт: 1-1,5/сут.); A – количество личного состава, задействованного для ремонта ТС; τ – время работы специалистов ремонтников.

Вероятность возникновения эксплуатационных отказов рассчитывается по выражению:

$$P_{\text{отк}}(t) = 1 - e^{-k_{\text{оп}} \omega_{\text{отк}} t}. \quad (8),$$

где $k_{\text{оп}}$ – «коэффициента опытности» персонала, табл. 3; $\omega_{\text{отк}} = 1/T_o$ – интенсивность отказов техники связи; T_o – средняя наработка на отказ для каждой группы ТС, значения которой определяются эксплуатационной документацией на каждый образец ТС.

Таблица 3 – Значения «коэффициента опытности» персонала

Количество месяцев, в течение которых накоплен опыт	5	15	20	25	30	35	40 и более
Коэффициент опытности	0,31	0,44	0,61	0,91	1,05	1,14	1,17

При расчете количества ТС, поставляемой со снабжения – $N_{\text{сн}}$ (9), следует учитывать количество ТС с сильными повреждениями и относящейся к безвозвратным потерям.

$$N_{\text{сн}}(t_j) = \sum_{k=1}^m N_{\text{кр}}(t_j) + N_{\text{бп}}(t_j). \quad (9)$$

3) На третьем этапе производится расчет общего количества потерь техники связи.

При расчете общего количества потерь ТС по суткам операции учитывается количество ТС, вышедшей из строя по причине деструктивных воздействий, эксплуатационных отказов, а также восполнения потерь с учетом восстановления и снабжения.

$$N_{\text{потерь}}(t_j) = \sum_{k=1}^m N_{\text{бп}}(t_j) + N_{\text{отк}}(t_j) - N_{\text{восст}}(t_j) - N_{\text{сн}}(t_j). \quad (10)$$

Оценка качества разработанной методики прогнозирования потерь техники связи в условиях деструктивных воздействий

Для определения точности расчета разработанной методики проведен сравнительный анализ выходных результатов и произведена оценка среднего отклонения от фактических значений, полученных на основе статистических оценок за предыдущие этапы операции, табл. 2.

Таблица 2 – Результаты сравнения прогнозируемых потерь техники связи

Интервал времени	Фактические потери ТС, ед.	Расчет диапазона существующими методиками, ед.	Расчет разработанной методикой, ед.	Расхождение существующих методик, ед.	Расхождение разработанной методикой, ед.
0-6 часов	2	1-4	2	0-2	0
6-12 часов	5	4-8	5	0-3	0
12-24 часа	10	8-14	10	0-4	0
1-2 суток	18	15-22	18	0-4	0
2-3 суток	25	20-30	24	3-5	1
3-4 суток	32	27-37	31	3-5	1
4-5 суток	40	34-46	39	3-6	1
5-7 суток	50	42-58	49	3-8	1
7-10 суток	60	51-69	59	3-9	1

Таким образом, среднее отклонение составляет для существующих методик – 15 %, а для разработанной методики – 3 %. При этом проведенная оценка эффективности разработанной методики показала, значительные преимущества перед существующими подходами. Внедрение данной методики позволит повысить качество расчета прогнозируемых потерь ТС и оптимизировать процессы снабжения и восстановления.

Заключение

Разработанная методика прогнозирования потерь техники связи в условиях деструктивных воздействий представляет собой значительный шаг вперед в области оценки устойчивости и эффективности систем связи. Учет динамических параметров, таких как вероятность поражения с учетом степени защищенности, а также применение технологий искусственного интеллекта для анализа степени повреждения, позволяют существенно повысить точность прогнозов и адаптировать методику к современным вызовам. Интеграция актуальных данных о деструктивных воздействиях, тактико-технических характеристиках оборудования и условиях эксплуатации обеспечивает комплексный подход к решению задачи прогнозирования.

Практическая значимость методики заключается в ее способности оперативно рассчитывать потери в реальном времени, что особенно важно в условиях чрезвычайных ситуаций. Программная реализация на основе технологий искусственного интеллекта не только автоматизирует процесс расчетов, но и предоставляет инструменты для поддержки принятия решений должностными лицами, отвечающими за ТОС и АСУ. Это позволяет своевременно принимать меры по защите и восстановлению оборудования, минимизируя ущерб и повышая устойчивость систем связи.

Литература

1. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – Санкт-Петербург: ВАС, 2006. 184 с.
2. Боговик А. В., Игнатов В. В. Теория управления в системах военного назначения: учебник. – Санкт-Петербург: ВАС, 2008. – 460 с.
3. Андреев А. В., Яковлев В. В., Короткая Т. Ю. Теоретические основы надежности технических систем: учебн. пособ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018 – 164 с.
4. Гречишников Е. В. Теоретические основы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления: учебник. – Орел: Академия ФСО России, 2013.
5. Лабунец А. М., Гречишников Е. В. и др. Теоретические основы технической эксплуатации средств телекоммуникационных систем: учебн. пособ. / под общ. ред. А. М. Лабунца. – Орел: Академия ФСО России, 2010. 299 с.
6. Манилюк Е. П., Гречишников Е. В., Гилядинов М. С. Моделирование отказов и восстановлений средств связи // Промышленные АСУ и контроллеры. 2023. № 6. С. 24-27.
7. Гречишников Е. В., Гилядинов М. С., Федяев Ю. Ю., Манилюк Е. П. Обеспечение оперативности восстановления средств связи в полевых условиях // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: материалы VIII межвузовской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 46–49.
8. Манилюк Е. П., Гречишников Е. В., Федяев Ю. Ю. Способ обеспечения своевременности восстановления связи // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения: материалы научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 178–180.
9. Патент РФ 2415457. Способ построения мобильного ремонтного органа средств связи / Гречишников Е. В., Белов А. С., Поминчук О. В., Иванов В. А., Горелик С. П., Маламагомедов Ш. М. Заявл. 04.03.2008. Оpubл. 27.03.2011. Бюл. № 9. 6 с.
10. Патент РФ 2646598. Способ обеспечения своевременности связи / Горелик С. П., Гречишников Е. В., Шумилин В. С., Норжилов З. Б. Заявл. 04.05.2017. Оpubл. 06.03.2018. Бюл. № 7. 5 с.
11. Патент РФ 2834450. Способ обеспечения своевременности восстановления связи / Гречишников Е. В., Гилядинов М. С., Сысуев С. Ю., Федяев Ю. Ю., Манилюк Е. П., Смирнов К. А., Гречишникова Т. А. Заявл. 22.03.2024. Оpubл. 11.02.2025. Бюл. № 5.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2024691340. Программа определения повреждения техники связи и автоматизированных систем управления / Манилюк Е.П. Заявл. 11.12.2024. Оpubл. 20.12.2024. Бюл. № 12.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2025610585. Программа распознавания и классификации поврежденной техники связи и автоматизированных систем управления / Манилюк Е.П. Заявл. 11.12.2024. Оpubл. 13.01.2025. Бюл. № 1.

References

1. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Effektivnost' sistem voennoy svyazi i metody ee otsenki* [Effectiveness of military communication systems and methods for its assessment]. St. Petersburg. VAS, 2006. 184 p. (In Russian).

2. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Teoriya upravleniya v sistemakh voennogo naznacheniya. Uchebnik* [Control theory in military systems. Textbook]. St. Petersburg. VAS, 2008. 460 p. (In Russian).

3. Andreev A. V., Yakovlev V. V., Korotkaya T. Yu. *Teoreticheskie osnovy nadezhnosti tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie* [Theoretical foundations of reliability of technical systems: textbook]. St. Petersburg. Politekh. un-t. publ., 2018. 164 p. (In Russian).

4. Grechishnikov E. V. *Teoreticheskie osnovy tekhnicheskogo obespecheniya svyazi i avtomatizirovannykh sistem upravleniya* [Theoretical Foundations of Technical Support for Communication and Automated Control Systems]. Orel. Academy of the Federal Protective Service of Russia, 2013. (In Russian).

5. Labunets A. M., Grechishnikov E. V., et al. *Teoreticheskie osnovy tekhnicheskoy ehkspluatatsii sredstv telekommunikatsionnykh sistem* [Theoretical Foundations of Technical Operation of Telecommunication Systems]. Orel. A Academy of the Federal Protective Service of the Russia, 2010. 299 p. (In Russian).

6. Manilyuk E. P., Grechishnikov E. V., Gilyadzinov M. S. *Modelirovanie otkazov i vosstanovlenij sredstv svyazi* [Modeling Failures and Recovery of Communication Equipment]. Industrial ACS and Controllers. 2023. No. 6. Pp. 24-27. (In Russian).

7. Grechishnikov E. V., Gilyadzinov M. S., Fedyaev Yu. Yu., Manilyuk E. P. *Sposob obespecheniya operativnosti vosstanovleniya sredstv svyazi v polevykh usloviyakh* [Method of ensuring the efficiency of communication means restoration in field conditions]. *Materialy VIII mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh"* [Proceedings of the VIII interuniversity scientific-practical conference "Problems of technical support of troops in modern conditions"]. Saint Petersburg, 2023. Pp. 46–49. (In Russian).

8. Manilyuk E. P., Grechishnikov E. V., Fedyaev Yu. Yu. *Sposob obespecheniya svoevremennosti vosstanovleniya svyazi* [A Method for Ensuring Timely Communication Recovery]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya infokommunikatsionnykh setey svyazi special'nogo naznacheniya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current State and Prospects for the Development of Special-Purpose Infocommunication Networks. Materials of the Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, 2024. Pp. 178-180. (In Russian).

9. Patent RF 2415457. *Sposob postroeniya mobil'nogo remontnogo organa sredstv svyazi* [Method of constructing a mobile repair unit for communication means]. Grechishnikov E. V., Belov A. S., Pominchuk O. V., Ivanov V. A., Gorelik S. P., Malamagomedov Sh. M. Declared 04.03.2008. Published 27.03.2011. Bulletin No. 9. 6 p. (In Russian).

10. Patent RF 2646598. *Sposob obespecheniya svoevremennosti svyazi* [Method of ensuring timely communication]. Gorelik S. P., Grechishnikov E. V., Shumilin V. S., Norzhilov Z. B. Declared 04.05.2017. Published 06.03.2018. Bulletin No. 7. 5 p. (In Russian).

11. Patent RF 2834450. *Sposob obespecheniya svoevremennosti vosstanovleniya svyazi* [Method of ensuring timely restoration of communication]. Grechishnikov E. V., Gilyadzinov M. S., Sysuev S. Ju., Fedjaev Ju. Ju., Manilyuk E. P., Smirnov K. A., Grechishnikova T. A. Declared 22.03.2024. Published 11.02.2025. Bulletin No. 5. (In Russian).

12. Certificate of State Registration of a Computer Program RU 2024691340. Program for Determining Damage to Communication Equipment and Automated Control Systems. Manilyuk E. P. Filed on 11.12.2024. Published on 20.12.2024. Bulletin No. 12. (In Russian).

13. Certificate of State Registration of a Computer Program RU 2025610585. Program for Recognition and Classification of Damaged Communication Equipment and Automated Control Systems. Manilyuk E. P. Filed on 11.12.2024. Published on 13.01.2025. Bulletin No. 1. (In Russian).

Статья поступила 14 марта 2025 г.

Информация об авторах

Манилюк Евгения Петровна – адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи. Область научных интересов: техническое обеспечение связи. Тел.: +7(812)247-98-42, E-mail: manilyusha@mail.ru.

Гречишникова Татьяна Анатольевна – научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи. Область научных интересов: разработка методологии информационного противоборства в технической сфере. Тел.: +7(812)247-98-42, E-mail: veajdef@mail.ru. Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Methodology for predicting losses of communication equipment under destructive emergency conditions

E. P. Maniliuk, T. A. Grechishnikova

Annotation. Modern communication technologies are an integral part of critical infrastructure operations; however, their resilience to destructive impacts remains under threat. Traditional methods of loss forecasting often fail to account for the specific threats posed by emergency situations, making them insufficiently effective in modern conditions. In this regard, the development of new approaches to assessing potential damage to communication equipment, which consider the combined influence of emergency situations and other destructive factors, is of particular importance. This article presents a methodology based on the analysis of communication equipment parameters, impact characteristics, and operating conditions, aimed at improving the accuracy of forecasts and enhancing the resilience of communication systems in the face of modern risks. **The purpose** of the study is to develop a methodology for calculating predicted losses of communication equipment, taking into account destructive impacts and operational failures, in order to assess its resilience and operational efficiency. **The scientific novelty** of the developed methodology, in contrast to traditional approaches, lies in the consideration of the following factors: dynamic parameters, such as the probability of equipment damage considering its level of protection, and the application of artificial intelligence technologies to assess the degree of damage to communication equipment. The integration of new data involves the use of up-to-date information on the means and methods of applying destructive impacts, the tactical and technical characteristics of communication equipment, and its operating conditions. The algorithmic approach enables the automation of loss calculations for communication equipment and improves the accuracy of forecasting. **The results confirm** the applicability of the proposed methodology for forecasting losses under destructive impact conditions, ultimately contributing to enhancing the resilience of communication systems, optimizing their functionality, and enabling timely decision-making for equipment protection and recovery. **The practical significance of the developed methodology** lies in its ability to perform real-time loss calculations and provide decision-making support for technical support personnel and automated control systems through a software implementation based on artificial intelligence technologies, aimed at restoring damaged communication equipment.

Keywords: artificial intelligence technologies, destructive impacts, unmanned aerial vehicles, loss forecasting, operational failures, stability of communication systems.

Information about authors

Maniliuk Evgeniia Petrovna – The postgraduate student at the Department of technical support of communication and automation of the Military Academy of Communications. Field of research: technical support of communication systems. Tel: +7 (812) 247 – 98 – 42. E-mail: manilyusha@mail.ru.

Grechishnikova Tatiana Anatolyevna Grechishnikova – Researcher at the Military Academy of Communications. Field of research: technical support of communication systems. Tel.: 8(812)247-98-42. E-mail: e.v.grechishnikov@rubin-spb.ru. Address: Russia, 194064, St-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3

Для цитирования: Манилюк Е. П., Гречишникова Т. А. Методика прогнозирования потерь техники связи в условиях деструктивных воздействий // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 49-56. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-49-56

For citation: Maniliuk E. P., Grechishnikova T. A. Methodology for predicting losses of communication equipment under destructive emergency conditions. Means of Communication Equipment. 2025. No 1 (169). Pp. 49-56. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-49-56. (In Russian).

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.39

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-57-63

Метод перераспределения ресурсов в подсистеме восстановления военной техники связи

Бердюгин И. С.

Аннотация. В статье описан метод перераспределения ресурсов в подсистеме восстановления военной техники связи за счет динамического перераспределения имеющихся сил и средств. **Целью** является повышение эффективности функционирования системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления. Представлены этапы метода, включая обоснование оптимальной структуры подсистемы восстановления, проведение ранжирования показателей по критерию вклада в достижение требуемого уровня обеспеченности, динамическое перераспределение сил и средств. Приведен критерий оптимизации, позволяющий создать рациональную структуру системы, которая повысит эффективность ее функционирования. **Новизна** работы – ключевым элементом предложенного подхода является применение усовершенствованного метода последовательных назначений, обеспечивающего достижение экстремума целевой функции при соблюдении ограничений, связанных с имеющимися ресурсами, условиями эксплуатации и внешними воздействиями. Получены следующие **результаты**: структура подсистемы восстановления техники связи и автоматизированных систем управления, оптимальная из множества допустимых, в которой ресурсы распределены по операциям с учетом ранжирования соответствующих показателей производственной деятельности по их вкладу в достижение цели. **Практическая значимость** состоит в возможности программной реализации предлагаемого метода, что позволит сократить цикл оперативного управления в ходе подготовки к выполнению задач по связи.

Ключевые слова: подсистема восстановления военной техники связи, техника связи и автоматизированных систем управления, динамическое перераспределение, метод последовательных назначений, ранжирование

Введение

Современные вооруженные конфликты характеризуются значительным изменением состава вооружения, военной и специальной техники, появлением новых оперативных задач, задач связи, что предъявляет качественно новые требования к системе технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ).

Для решения задач ТОС и АСУ создается система технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (система ТОС и АСУ), являющаяся составной частью системы связи и состоящая из подсистем управления (органы управления), снабжения (органы снабжения ТС и АСУ) и восстановления (ремонтные органы) [1].

Основной задачей ТОС и АСУ в операции является восстановление работоспособности и возвращение в строй техники связи и автоматизированных систем управления (ТС и АСУ) в максимально короткие сроки [2]. Для повышения эффективности функционирования подсистемы восстановления ранее проводились исследования данного вопроса с использованием различных методов. В работе [3] вводилось понятие «значимость», как показатель, отражающий трудоемкость ремонта, однако уровень прогнозируемых потерь техники связи, потерь сил и средств технического обеспечения, расход ремонтных комплектов при формировании рациональной очереди ремонта не учитывались.

В данной работе представлен метод динамического перераспределения ресурсов в подсистеме восстановления в целях повышения эффективности функционирования системы ТОС и АСУ, что обеспечит выполнение требований по боевой готовности, устойчивости, мобильности, пропускной способности, разведывательной защищенности, доступности и управляемости, предъявляемых к ней системой связи. [4].

Обоснование оптимальной структуры подсистемы восстановления

Система ТОС и АСУ должна обладать способностью реагировать на прогнозируемый уровень выхода из строя техники связи, что позволит оперативно принимать решения на изменение обстановки и поддерживать эффективность функционирования на требуемом уровне.

В условиях современных вооруженных конфликтов наиболее существенные проблемные вопросы связаны с проведением восстановления ТС и АСУ [2]. Исследование таких технически сложных систем требует поэтапного подхода, описанного в ряде исследований [5, 6].

Также имеется ряд проблемных вопросов в научной деятельности, связанных с тем, что существующий научно-методический аппарат не учитывает особенности современных вооруженных конфликтов при формировании системы ТОС и АСУ и отсутствуют критерии для выбора ее оптимальной структуры.

Работа должностных лиц при подготовке к выполнению задач должна быть направлена на формирование такой структуры системы ТОС и АСУ, которая обеспечит выполнение требований, предъявляемых к ней системой связи, в первую очередь, исходя из цели ее функционирования, по производственным возможностям [7].

Оптимальная структура системы ТОС и АСУ, позволяющая достичь максимальную эффективность ее функционирования, определяется по комплексному показателю – уровню обеспеченности ТС и АСУ $Q_{\text{ТОС}}(1)$ в области ограничений и допустимых значений D (2):

$$G^* : \langle G \rangle \rightarrow \max_{(t)} Q_{\text{ТОС}} \left| Q_{\text{ТОС}}(t) \geq Q_{\text{ТОС треб}}(t) \right. \quad (1)$$

где G^* – оптимальная структура системы ТОС и АСУ, G – множество структур систем ТОС и АСУ, $Q_{\text{ТОС треб}}(t)$ – требуемый уровень обеспеченности ТС и АСУ.

$$D = \left\{ P_{\text{ТОС}} \subset P_{\text{СС}} \left| \begin{array}{l} P_{\text{ТОС}i \min} \leq P_{\text{ТОС}i} \leq P_{\text{ТОС}i \max}, i = 1:r \\ Q_{\text{доп}} \leq Q \leq Q_{\text{исх}} \end{array} \right. \right\} \quad (2)$$

где $P_{\text{СС}}$ – показатели системы связи, $P_{\text{ТОС}i}$ – показатели производственных возможностей подсистемы восстановления, r – счетное число показателей.

Оптимальное решение о состоянии системы принимается исходя из максимального значения уровня обеспеченности работоспособной ТС и АСУ при соблюдении соответствующих ограничений и допущений.

Метод перераспределения ресурсов в подсистеме восстановления военной техники связи

Построение оптимальной структуры системы ТОС и АСУ может достигаться путем динамического перераспределения имеющихся сил и средств с учетом ранжирования соответствующих показателей производительности по их вкладу в достижение цели, что позволяет достигать экстремальных значений целевой функции при соблюдении всех заданных ограничений и допущений. В качестве математического аппарата в ходе исследования применен метод последовательных назначений. Обобщенная блок-схема метода представлена на рис. 1.

На 1 этапе рассчитываются прогнозируемые потери и выход в различные виды ремонта ТС и АСУ (рис. 2)

Прогнозируемые потери ТС и АСУ, выход в различные виды ремонта определяются по выражению (3):

$$N_{\text{п}}(t) = \left(\frac{N_{\text{бп}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{ср}} + N_{\text{кр}}}{T} \right) \cdot K_{\text{оп}} \cdot K_{\text{ср}(t)} \quad (3)$$

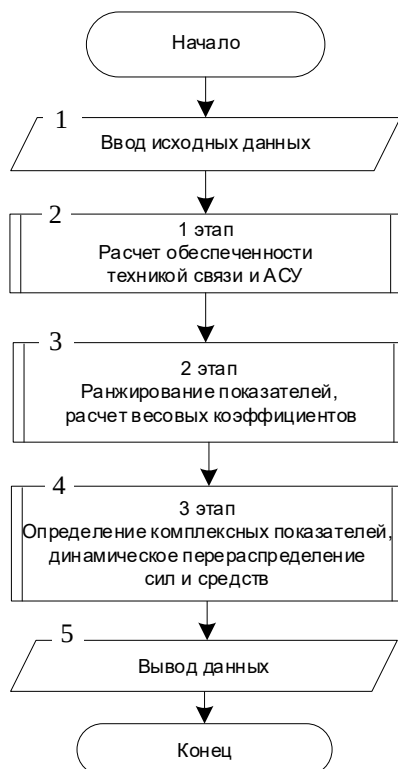


Рис. 1. Обобщенная блок-схема метода перераспределения ресурсов

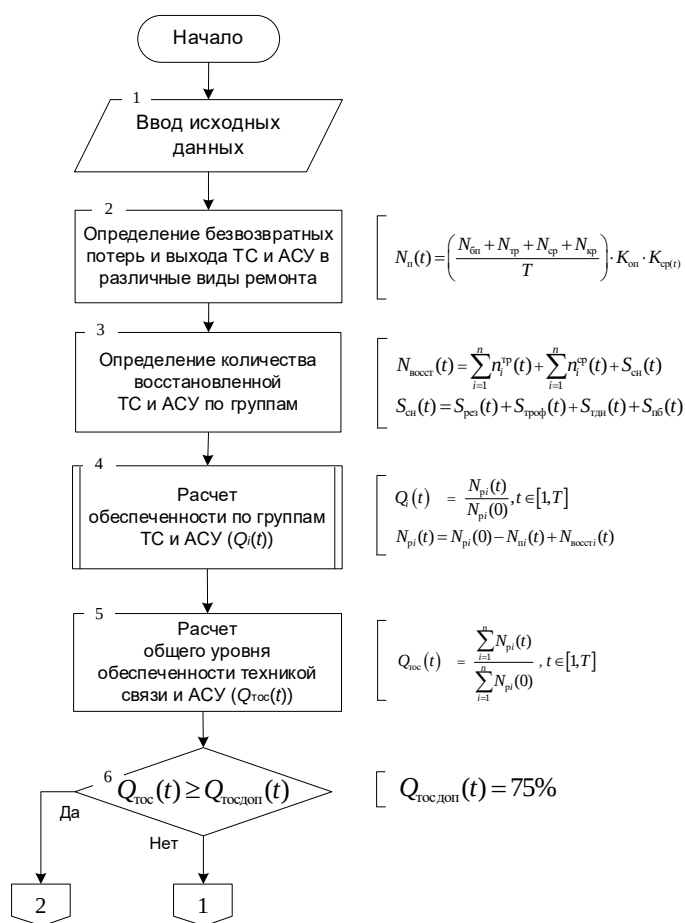


Рис. 2. Блок-схема 1 этапа

где $N_{бп}$, $N_{кр}$, $N_{ср}$, $N_{тр}$ – количество ТС и АСУ, переходящей в категорию безвозвратных потерь и выходящей в капитальный, средний и текущий ремонт соответственно, $K_{оп}$ – коэффициент, учитывающий оперативное построение войск, $K_{ср}(t)$ – коэффициент, учитывающий воздействие ударных средств противника. Вышеуказанные показатели определяются в соответствии с нормативными документами МО РФ.

Далее рассчитывается количество восстановленной ТС и АСУ силами подсистемы восстановления (4) и подсистемы снабжения (5):

$$N_{восст}(t) = \sum_{i=1}^n n_i^{тр}(t) + \sum_{i=1}^n n_i^{ср}(t) + S_{сн}(t), \quad (4)$$

где $n_i^{тр}$ – количество текущих ремонтов i -группы ТС и АСУ, $n_i^{ср}$ – количество средних ремонтов i -группы ТС и АСУ, t – время восстановления, $S_{сн}(t)$ – объем ТС и АСУ, восстановленный подсистемой снабжения за счет резерва, трофейной техники, техники двойного назначения и местной производственной базы соответственно.

$$S_{сн}(t) = S_{рез}(t) + S_{троф}(t) + S_{гдн}(t) + S_{пб}(t). \quad (5)$$

Количество работоспособной ТС и АСУ на момент времени t определяется по выражению (6).

$$N_{pi}(t) = N_{pi}(0) - N_{пи}(t) + N_{восстi}(t), \quad (6)$$

где $N_{pi}(0)$ – количество работоспособной ТС и АСУ i -группы в начальный момент, $N_{пи}(t)$ – количество потерь ТС и АСУ i -группы в момент времени t , $N_{восстi}(t)$ – количество восстановленной ТС и АСУ i -группы к моменту времени t , рассчитываемое по выражению (7).

$$N_p = \frac{\tau \cdot A \cdot t}{W_{рем}}, \quad (7)$$

где τ – продолжительность работы специалистов-ремонтников, A – количество специалистов технического обеспечения, t – время восстановления, $W_{рем}$ – трудоемкость ремонта, рассчитываемые исходя из штатной численности подразделений и планируемых сроков выполнения задач [7].

В завершении рассчитывается прогнозируемый уровень обеспеченности по группам ТС и АСУ (8) и определяется комплексный показатель эффективности системы ТОС и АСУ (9):

$$Q_i(t) = \frac{N_{pi}(t)}{N_{pi}(0)}, t \in [1, T], \quad (8)$$

$$Q_{тос}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{pi}(t)}{\sum_{i=1}^n N_{pi}(0)}, t \in [1, T]. \quad (9)$$

На втором этапе метода производится ранжирование показателей производительности системы ТОС и АСУ по критерию их важности. Учитывая многовариантность ресурсных связей, переменную скорость выполнения операций и вариативность различных организационно-технических систем, наиболее предпочтительными являются следующие методы ранжирования показателей, выбираемые в зависимости от задач, стоящих перед должностными лицами технического обеспечения, условий операции и других факторов:

- 1) Метод взвешенных критериев.
- 2) Метод ранжирования на основе экспертных оценок.
- 3) Метод ранжирования на основе статистических данных.
- 4) Метод анализа иерархий.

На завершающем этапе производится динамическое перераспределение имеющихся сил и средств подсистемы восстановления (рис. 3).

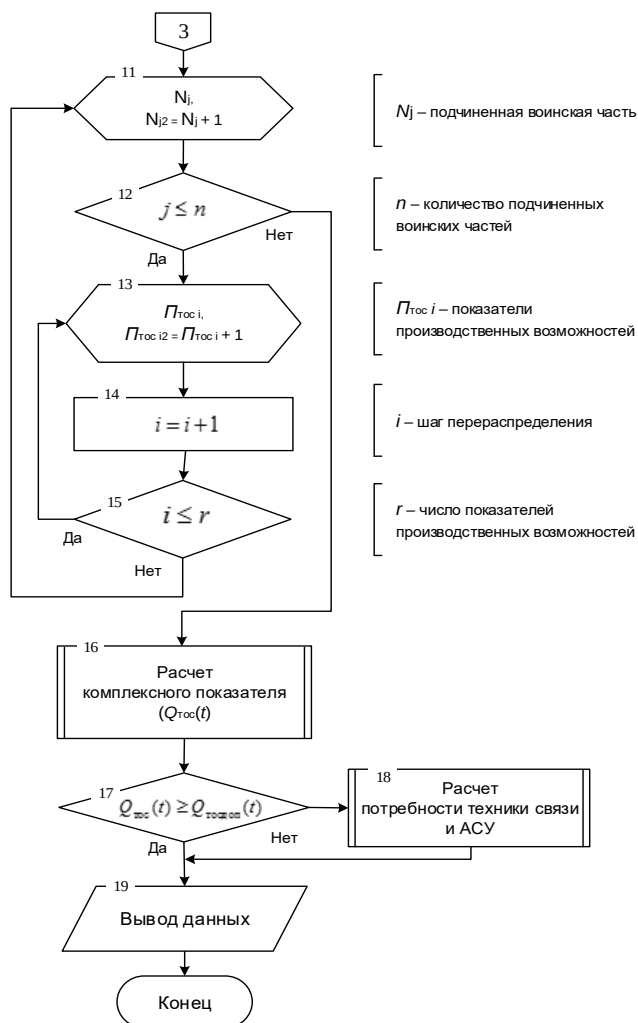


Рис. 3. Блок-схема 3 этапа

В соответствии с разработанным методом процесс определения оптимальной структуры подсистемы восстановления и достижения максимальной эффективности функционирования системы ТОС и АСУ (1) разбивается на счетное количество циклов, в каждом из которых ресурсы конкретного показателя производственных возможностей, имеющего резервы, перераспределяются по операциям, имеющим наибольшую важность,

Заключение

Предложенный метод перераспределения ресурсов представляет собой подход, основанный на проведении ранжирования показателей производственной деятельности по критерию вклада в результат. Ключевой составляющей метода является динамическое перераспределение имеющихся сил и средств, обеспечивающее достижение экстремума целевой функции при соблюдении ограничений, связанных с имеющимися ресурсами, условиями эксплуатации и внешними воздействиями.

Научной новизной работы является учет показателей производственных возможностей (трофейная техника связи, техника связи двойного назначения, использование местной промышленной базы), ранее не рассматривавшихся в научных работах данной области.

Практическая значимость исследования заключается в том, что в методе предложен подход к повышению эффективности функционирования подсистемы восстановления военной техники связи, развитие которой является приоритетным в условиях современных вооруженных конфликтов.

Программная реализация метода позволит должностным лицам органов управления техническим обеспечением сократить цикл оперативного управления в ходе подготовки к выполнению задач по предназначению. Метод предлагается для научно-исследовательских организации ВС РФ, высших военных образовательных учреждений профессионального образования с целью обоснования и выработки руководящих документов, регламентирующих организацию ТОС и АСУ, внедрения результатов исследования в учебный процесс.

Литература

1. Шептура В. Н., Чиркунов М. В. Подходы к организации мероприятий технической эксплуатации техники связи и автоматизированных систем управления Вооруженных Сил Российской Федерации // Военная мысль. 2021. № 3. С. 64-72.
2. Чихачев А. В., Бердюгин И. С., Козляков Д. К. Пути совершенствования системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления // Труды VI межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях», ВАС. 2021. С. 21-27.
3. Мякотин А. В., Бурлаков А. А., Моргунов А. Я., Вишняков Н. И. Способ повышения эффективности системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления в локальных войнах и вооруженных конфликтах // Вопросы оборонной техники. 2022. № 11-12. С. 131-138.
4. ГОСТ РВ 0158-006-2018. Связь военная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.
5. Коновалов О. А., Коновальчук Е. В., Малыков К. А., Сербулов Ю. С. Метод оптимизации структуры детерминированной сетевой модели // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2012. № 2. С. 111-116.
6. Зырянов Ю. Т., Коновалов О. А., Малыков К. А. Система управления рациональным распределением ресурсов на основе модернизированного метода последовательных назначений // Control Scienses. 2011. № 1. С. 55-62.
7. Коморников П. М., Бердюгин И. С., Сафиулов Д. М. Методика расчета количества сил и средств технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления в операции // Труды VII межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях», ВАС. 2022. С. 135-139.

References

1. Sheptura V.N., Chirkunov M.V. *Podhody k organizacii meropriyatij tekhnicheskoy ekspluatatsii tekhniki svyazi i avtomatizirovannyh system upravleniya Vooruzhennyh Sil Rossijskoj Federacii*. [Approaches to the organization of events for the technical operation of communications equipment and automated control systems of the Armed Forces of the Russian Federation]. Moscow. Military thought. 2021. № 3. S. 64-72. (In Russian).
2. Chihachev A.V., Berdyugin I.S., Kozlyakov D.K. *Puti sovershenstvovaniya sistemy tekhnicheskogo obespecheniya svyazi i avtomatizirovannyh system upravleniya*. [Ways to improve the system of technical support for communications and automated control systems]. Proceedings of the VI Interuniversity Scientific and Practical Conference «Problems of Technical Support of Troops in Modern Conditions». Saint Petersburg. VAS. 2021. S. 21-27. (In Russian).
3. Myakotin A.V., Burlakov A.A., Morgunov A.Ya., Vishnyakov N.I. *Sposob povysheniya effektivnosti sistemy remonta tekhniki svyazi i avtomatizirovannyh system upravleniya v lokal'nyh voynah i vooruzhennyh konfliktah*. [Method for increasing the efficiency of the repair system of communications equipment and automated control systems in local wars and armed conflicts]. Saint Petersburg. Defense technology issues. 2022. № 11-12. S. 131-138. (In Russian).
4. GOST RV 0158-006-2018. *Svyaz' voennaya. Terminy i opredeleniya*. [Military communications. Terms and definitions]. Moscow. Standartinform. 2018. 24 s. (In Russian).
5. Konovalov O.A., Konoval'chuk E.V., Malykov K.A., Serbulov Yu.S. *Metod optimizatsii struktury determinirovannoj setевой modeli*. [Method for optimizing the structure of a deterministic network model]. Bulletin of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies. 2012. № 2. S. 111-116. (In Russian).

6. Zyryanov Yu.T., Konovalov O.A., Malykov K.A. *Sistema upravleniya racional'nykh raspredeleniem resursov na osnove modernizirovannogo metoda posledovatel'nykh naznachenij*. [A system for managing rational resource allocation based on a modernized method of sequential assignments]. Control Sciences. 2011. № 1. S. 55-62. (In Russian).

7. Komornikov P.M., Berdyugin I.S., Safiulov D.M. *Metodika rascheta kolichestva sil i sredstv tekhnicheskogo obespecheniya svyazi i avtomatizirovannykh system upravleniya v operacii*. [Methodology for calculating the number of forces and means of technical support for communications and automated control systems in an operation]. Proceedings of the VII Interuniversity Scientific and Practical Conference «Problems of Technical Support of Troops in Modern Conditions». Saint Petersburg. VAS. 2022. S. 135-139. (In Russian).

Статья поступила 07 марта 2025 г.

Информация об авторах

Бердюгин Иван Сергеевич – адъюнкт кафедры Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: техническое обеспечение войск (сил). Тел. +7 (812) 247–98–42, E-mail: ivan22mailru@mail.ru.

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

Method of resource redistribution in the subsystem of restoration of military communication equipment

I. S. Berdyugin

Annotation. The article describes a method for redistributing resources in the military communications equipment restoration subsystem by dynamically redistributing available forces and assets. **The goal** is to improve the efficiency of the communications technical support system and automated control systems. The method stages are presented, including substantiation of the optimal structure of the restoration subsystem, ranking of indicators by the criterion of contribution to achieving the required level of provision, dynamic redistribution of forces and assets. An optimization criterion is given that allows creating a rational structure of the system that will increase the efficiency of its functioning. **The novelty of the work** is the key element in the use of an improved method of sequential assignments, ensuring the achievement of the extremum of the objective function while observing the restrictions associated with available resources, operating conditions and external influences. **The following results** are obtained: the structure of the communications equipment restoration subsystem and automated control systems is optimal from a set of admissible ones, in which resources are distributed among operations taking into account the ranking of the corresponding indicators of production activity by their contribution to achieving the goal. **The practical significance** lies in the possibility of software implementation of the proposed method, which will reduce the operational management cycle during preparation for the implementation of communications tasks.

Keywords: military communications equipment restoration subsystem, communications equipment and automated control systems, dynamic redistribution, sequential assignment method, ranking

Information about Authors

Berdyugin Ivan Sergeevich – adjunct of the department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. Research interests: technical support of troops (forces). Tel. +7(812)247–98–42, E-mail: ivan22mailru@mail.ru.

Address: 194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky Prospekt, 3.

Для цитирования: Бердюгин И.С. Метод перераспределения ресурсов в подсистеме восстановления военной техники связи // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 57-63. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-57-63

For citation: Berdyugin I.S. Method of resource redistribution in the subsystem of restoration of military communication equipment Means of Communication Equipment. 2025. No. 1 (169). Pp. 57-63. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-57-63

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-64-71

Средство снижения пик-фактора сигналов FBMC с вариативными критериями останова подбора фаз в методе PTS

Ишмиев И. И., Логинов С. С.

Аннотация. Сигналы многоканальной модуляции с использованием банка фильтров (*Filter-Bank Multi-Carrier*) характеризуются высоким пик-фактором (*Peak-to-Average Power Ratio*), что приводит к нелинейным искажениям в усилителях мощности. **Постановка задачи:** Сравнение схем снижения пик-фактора, использующих два критерия останова, позволяет выявить наиболее эффективный из них с точки зрения реализации в системах передачи информации с многочастотной модуляцией с использованием банка фильтров. **Целью работы** является определение влияния критерия останова на снижение пик-фактора сигналов многочастотной модуляции с использованием банка фильтров методом частичной передачи последовательности на результирующие характеристики пик-фактора и энтропии сигналов. **Используемые методы:** для исследования применяются алгоритмы выбора фазовых множителей в методе частичной передачи последовательности, а также вычисление показателей пик-фактора и энтропии для оценки эффективности. **Новизна:** состоит в том, что впервые проведён сравнительный анализ эффективности снижения пик-фактора и энтропии использованием критерия останова по энтропии и пик-фактору в методе частичной передачи последовательности для сигналов с многоканальной модуляцией с использованием банка фильтров с учётом вариаций количества окон и итераций. **Результат:** заключается в том, что критерий останова по пик-фактору даёт более выраженный эффект на первых шагах, но требует точной настройки количества итераций и окон, так как дальнейшее увеличение этих параметров даёт малозначительный прирост, тогда как критерий останова по энтропии обеспечивает более стабильное снижение пик-фактора, но эффект её менее выражен. **Практическая значимость:** заключается в улучшении характеристик сигналов многочастотной модуляции с использованием банка фильтров, что позволяет снизить энергопотребление и повысить эффективность усилителей мощности в системах связи нового поколения.

Ключевые слова: многоканальная модуляция с использованием банка фильтров, *Filter-Bank Multi-Carrier*, метод частичной передачи последовательности, энтропия, пик-фактор, *Peak-to-Average Power Ratio*, системы связи.

Введение

Современные системы беспроводной связи предъявляют всё более высокие требования к спектральной эффективности и надёжности передачи данных. Одним из популярных методов модуляции является *FBMC (Filter Bank Multicarrier)* — технология частотного мультиплексирования с множеством несущих, которая отличается высокой спектральной плотностью и устойчивостью к межсимвольным и межканальным интерференциям. Однако для *FBMC* характерен высокий пик-фактор (*PAPR*), который может вызвать значительные нелинейные искажения в усилителях мощности, снижая их энергоэффективность и качество передачи данных [1-4].

Среди методов снижения *PAPR* выделяется метод частичной передачи последовательностей (*PTS*), который базируется на разбиении исходного сигнала на несколько блоков (окон), изменении фазы элементов каждого окна сигнала, суммирования окон с учетом псевдослучайных фазовых сдвигов и формирования результирующего сигнала [5-8]. Несмотря на доказанную эффективность *PTS*, его реализация сопряжена с рядом сложностей, связанных с выбором критериев снижения пик-фактора. В этой работе

исследуются два подхода снижения пик-фактора методом *PTS*, отличным критерием останова выбора псевдослучайных фаз сигналов:

1) *Критерий останова по энтропии сигнала*. В данном случае энтропия используется как метрика для оценки степени случайности или распределения мощности сигнала. Это может быть полезно для выбора фазовых комбинаций, которые минимизируют избыточность и способствуют равномерному распределению мощности, что в свою очередь может уменьшить пик-фактор.

2) *Критерий останова по пик-фактору (PAPR)*. Это более традиционный подход, где после каждой итерации выбирается фазовая комбинация, минимизирующая пик-фактор напрямую. Этот метод направлен на минимизацию именно того параметра, который является основной целью задачи.

В связи с этим исследование методов снижения *PAPR*, таких как метод частичной передачи последовательностей (*PTS*), является актуальной задачей, особенно в контексте сетей связи пятого поколения (*5G*) и будущих технологий *6G*.

Постановка задачи

Сравнение схем снижения пик-фактора, использующих два критерия останова, позволяет выявить наиболее эффективный из них с точки зрения реализации в системах передачи информации с *FBMC*. Сравнение этих подходов проводится на основе количественного анализа характеристик сигнала, включая изменения *PAPR* и энтропии, при различных параметрах метода *PTS*, таких как количество окон и число фазовых множителей. Основная цель – это снижение пик-фактора методом *PTS*. В то же время [9] может одновременно достигаться увеличение информационной безопасности путем увеличения энтропии сигналов.

Целью исследования является определение влияния критерия останова итераций по преобразованию сигналов *FBMC* методом *PTS* на результирующие характеристики пик-фактора и энтропии сигналов.

Высокий пик-фактор сигналов *FBMC* вызывает снижение эффективности усилителей мощности и снижает надёжность передачи данных. Для решения данной проблемы необходимо:

- 1) Разработать и адаптировать методы снижения *PAPR* для сигналов *FBMC*.
- 2) Сравнить эффективность снижения пик-фактора по различным критериям останова – по энтропии и по пик-фактору.
- 3) Оценить влияние количества окон и итераций метода *PTS* на снижение *PAPR* и энтропию.

Влияние количества итераций на *PAPR* и энтропию при фиксированном количестве окон

На рис. 1 приведена диаграмма влияния количества итераций на изменение *PAPR*. Данная диаграмма демонстрирует, как изменение количества итераций метода *PTS* для 8 окон влияет на снижение пик-фактора. Первый столбик (синий) показывает изменение пик-фактора от изменения количества итераций при использовании критерия останова по пик-фактору, второй столбик (оранжевый) показывает изменение пик-фактора от изменения количества итераций при использовании критерия останова по энтропии. Видно, что при увеличении числа итераций *PAPR* имеется тенденция к снижению, особенно на начальных итерациях. При одной итерации *PAPR* снижается на 3.82 дБ, при двух итерациях критерий останова по *PAPR* дает снижение на 1.14 дБ. Однако дальнейшее увеличение количества итераций приводит к менее выраженным изменениям *PAPR*.

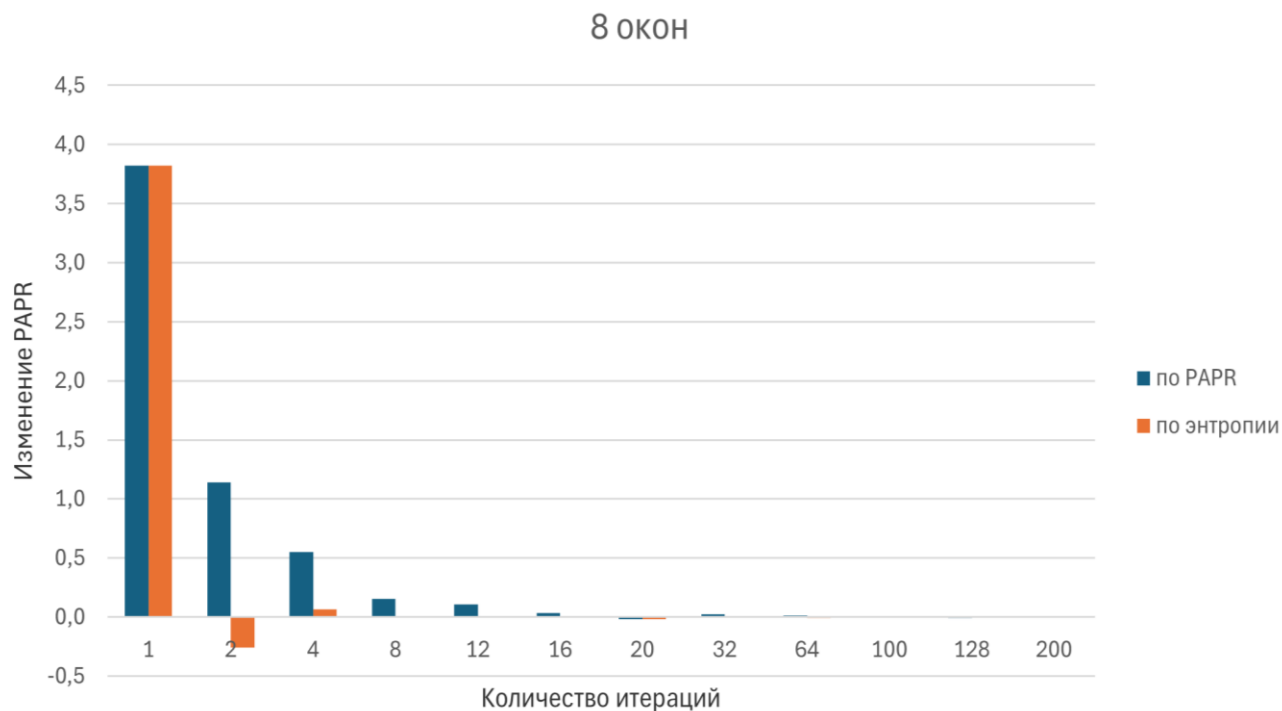


Рис. 1. Диаграмма влияния количества итераций на изменение PAPR

На рис. 2 приведена диаграмма влияния количества итераций на изменение энтропии.

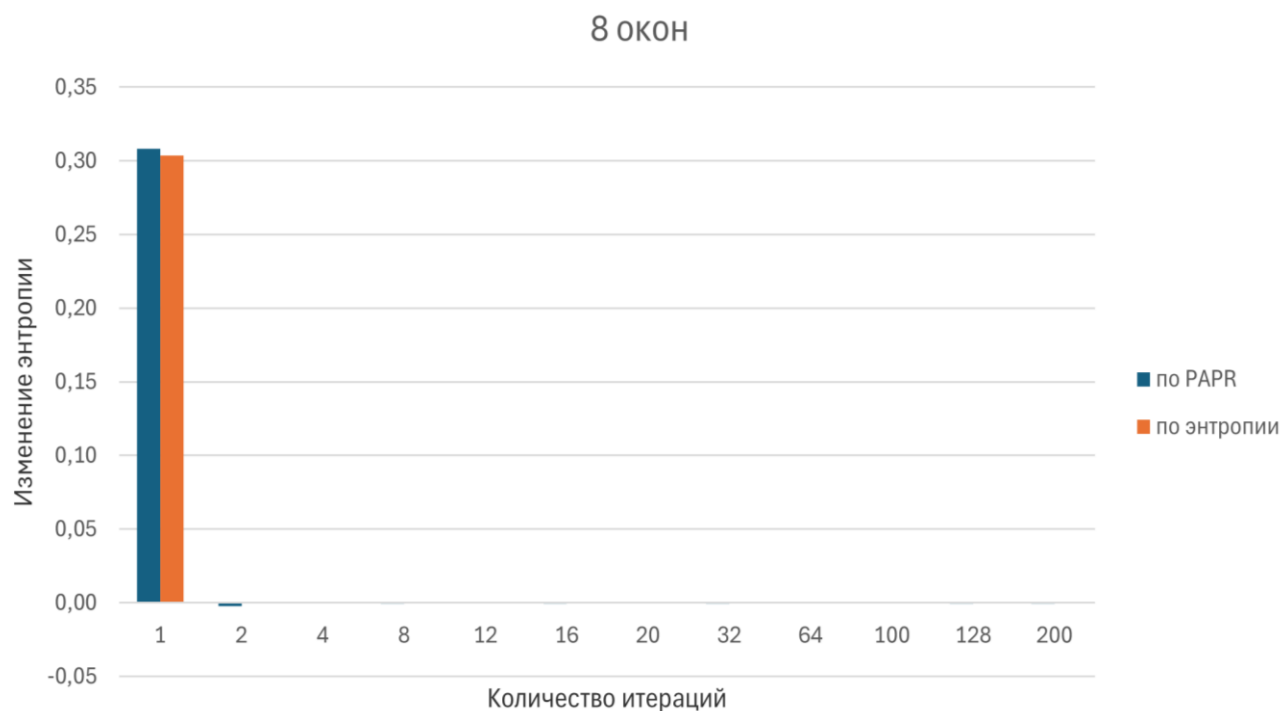


Рис. 2. Диаграмма влияния количества итераций на изменение энтропии

Анализ рис. 2 показывает, что наблюдаются следующие результаты: при одной итерации энтропия повышается на 0,31 при использовании критерия останова по пик-фактору и на 0,30 при использовании критерия останова по энтропии. После 4 итераций энтропия практически не изменяется. Таким образом, для изменения энтропии сигналов FBMC нет необходимости в большом количестве итераций по перебору фаз сигналов.

Влияние количества окон на PAPR и энтропию при фиксированном количестве итераций

На рис. 3 приведена диаграмма влияния количества окон на изменение $PAPR$. Из результатов видно, что с увеличением числа окон величина $PAPR$ значительно снижается. При увеличении числа окон с 2 до 8 изменение $PAPR$ по пик-фактору уменьшается с 4,08 до 0,37, что свидетельствует о повышенной эффективности метода при разбиении сигнала на окна меньшего размера. Однако при дальнейшем увеличении количества окон эффект становится менее выраженным.

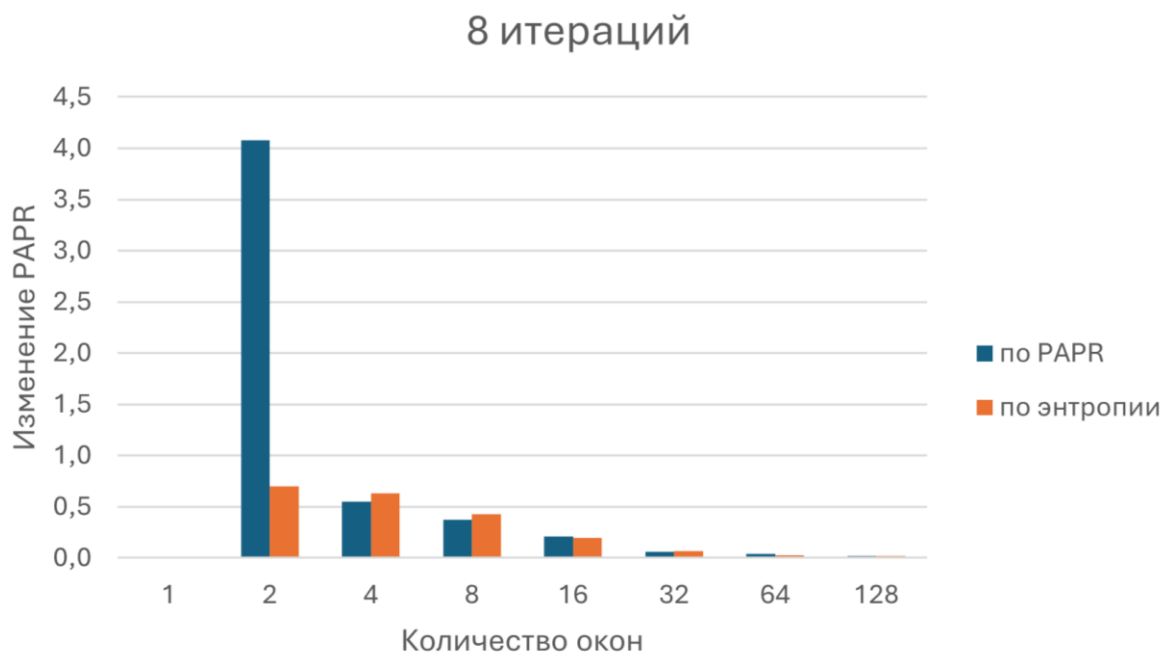


Рис. 3. Диаграмма влияния количества окон на изменение $PAPR$

Рис. 4 демонстрирует изменение энтропии в зависимости от количества окон.



Рис. 4. Диаграмма влияния количества окон на изменение энтропии

Видно, что при увеличении числа окон энтропия в целом остается стабильной. При делении символа на одно окно, наблюдается повышение энтропии на 0.2 при использовании критерия останова по пик-фактору и 0.3 при критерии останова по энтропии. При увеличении числа окон с 4 до 128 изменение энтропии незначительное. Это может свидетельствовать о том, что увеличение числа окон приводит к лучшему распределению мощности сигнала и более равномерному спектру.

Обсуждение результатов

1) При использовании критерия останова по энтропии сигнала наблюдается следующая тенденция: при увеличении количества итераций значительное снижение *PAPR* происходит на первых шагах снижения; после 2 итераций снижение составляет 0,25 по энтропии. Однако дальнейшее увеличение числа итераций не даёт существенного выигрыша.

Аналогичная ситуация наблюдается при увеличении количества окон. При разбиении на 2 окна снижение *PAPR* составляет 0.7 дБ, а при увеличении числа окон до 64 эффект уже не столь выражен (0.03).

Таким образом, критерий останова по энтропии не позволяет добиться одновременного эффективного снижения пик-фактора сигналов *FBMC*, так как энтропия достаточно быстро увеличивается при увеличении числа окон и итераций.

2) При использовании критерия останова по пик-фактору в отличие от критерия останова по энтропии, начальное снижение *PAPR* более выражено. При 2 итерациях снижение *PAPR* составляет 1.14, что значительно выше, чем при использовании критерия останова по энтропии. Однако дальнейшее увеличение количества итераций даёт гораздо меньший эффект: при 16 итерациях снижение составляет 0,03, а при 100 итерациях – всего 0,005.

При увеличении количества окон также наблюдается существенное снижение *PAPR* на первых шагах. Например, при 2 окнах пик-фактор снижается на 4,08, а при 8 окнах – уже на 0,37. Дальнейшее увеличение количества окон приводит к гораздо меньшему снижению пик-фактора.

Таким образом, критерий останова по пик-фактору позволяет достичь значительного эффекта по снижению пик-фактора и увеличению энтропии на первых этапах, его эффективность снижается по мере роста числа итераций и окон. Но в отличие от критерия останова по энтропии в данном случае обеспечивается больший дополнительный эффект по снижению пик-фактора при увеличении числа итераций.

Критерий останова по пик-фактору даёт более выраженный эффект на первых шагах, но требует точной настройки количества итераций и окон, так как дальнейшее увеличение этих параметров даёт меньший прирост снижения пик-фактора. Критерий останова по энтропии обеспечивает быстрое снижение энтропии сигнала, но не обеспечивает оценку необходимости увеличения числа итераций для дальнейшего снижения пик-фактора.

Литература

1. Логинов С. С., Ишмиев И. И., Сивинцева О. А. Методы снижения пик-фактора сигналов *FBMC* на основе дискретно-нелинейной системы Спротта, реализованной над конечным полем Галуа // *Инфокоммуникационные технологии*. 2024. Т. 22. № 1 (85). С. 64-69.
2. D. Na and K. Choi, "Low PAPR FBMC," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 1, pp. 182-193, Jan. 2018, doi: 10.1109/TWC.2017.2764028.
3. N. van der Neut, B. T. Maharaj, F. H. de Lange, G. González, F. Gregorio and J. Cousseau, "PAPR reduction in FBMC systems using a smart gradient-project active constellation extension method," 2014 21st International Conference on Telecommunications (ICT), Lisbon, Portugal, 2014, pp. 134-139, doi: 10.1109/ICT.2014.6845095.

4. J. -H. Moon, Y. -R. Nam and J. -H. Kim, "PAPR Reduction in the FBMC-OQAM System via Segment-Based Optimization," in IEEE Access, vol. 6, pp. 4994-5002, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2794366.
5. Z. He, L. Zhou, Y. Chen and X. Ling, "Low-Complexity PTS Scheme for PAPR Reduction in FBMC-OQAM Systems," in IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 11, pp. 2322-2325, Nov. 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2871263.
6. S. Lv, J. Zhao, L. Yang and Q. Li, "Genetic Algorithm Based Bilayer PTS Scheme for Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC/OQAM Signal," in IEEE Access, vol. 8, pp. 17945-17955, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967846.
7. H. Wang, X. Wang, L. Xu and W. Du, "Hybrid PAPR Reduction Scheme for FBMC/OQAM Systems Based on Multi Data Block PTS and TR Methods," in IEEE Access, vol. 4, pp. 4761-4768, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2605008.
8. H. Wang, X. Wang, L. Xu and W. Du, "Hybrid PAPR Reduction Scheme for FBMC/OQAM Systems Based on Multi Data Block PTS and TR Methods," in IEEE Access, vol. 4, pp. 4761-4768, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2605008.
9. Зуев М. Ю. Комплексное повышение эффективности радиоэлектронных устройств и систем передачи информации с OFDM на основе нелинейных систем с динамическим хаосом // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25. № 1. С. 55-64.
10. Сивинцева О. А. Средства маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе систем Спротта // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 47-56. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-47-56
11. Y. A. Jawhar et al., "A Review of Partial Transmit Sequence for PAPR Reduction in the OFDM Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 18021-18041, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2894527.
12. D. Qu, S. Lu and T. Jiang, "Multi-Block Joint Optimization for the Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC-OQAM Signals," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 61, no. 7, pp. 1605-1613, April 1, 2013, doi: 10.1109/TSP.2013.2239991.
13. Y. Sekiguchi, N. Nonaka and K. Higuchi, "PAPR Reduction Using Null Space in MIMO Channel for MIMO-OFDM Signals in Multiple-Antenna AF Relay Transmission," 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Norman, OK, USA, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625257.
14. I. A. A. Shaheen, A. Zekry, F. Newagy and R. Ibrahim, "Absolute Exponential Companding to Reduced PAPR for FBMC/OQAM," 2017 Palestinian International Conference on Information and Communication Technology (PICICT), Gaza City, 2017, pp. 60-65, doi: 10.1109/PICICT.2017.17.
15. M. A. Aboul-Dahab, M. M. Fouad and R. A. Roshdy, "Generalized Discrete Fourier Transform for FBMC Peak to Average Power Ratio Reduction," in IEEE Access, vol. 7, pp. 81730-81740, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921447.

References

1. Loginov S. S., Ishmiev I. I., Sivintseva O. A. *Metody snizheniya pik-faktora signalov FBMC na osnove diskretno-nelinejnoj sistemy Sprotta, realizovannoj nad konechnym polem Galua* [Methods for reducing the peak factor of BMC signals based on a discrete-nonlinear Sprott system implemented over a finite Galois field]. *Infokommunikacionnye tekhnologii* [Information and communication technologies]. 2024. Vol. 22. No. 1 (85). Pp. 64-69. (In Russian).
2. D. Na and K. Choi, "Low PAPR FBMC," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 1, pp. 182-193, Jan. 2018, doi: 10.1109/TWC.2017.2764028.
3. N. van der Neut, B. T. Maharaj, F. H. de Lange, G. González, F. Gregorio and J. Cousseau, "PAPR reduction in FBMC systems using a smart gradient-project active constellation extension method," 2014 21st International Conference on Telecommunications (ICT), Lisbon, Portugal, 2014, pp. 134-139, doi: 10.1109/ICT.2014.6845095.
4. J. -H. Moon, Y. -R. Nam and J. -H. Kim, "PAPR Reduction in the FBMC-OQAM System via Segment-Based Optimization," in IEEE Access, vol. 6, pp. 4994-5002, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2794366.
5. Z. He, L. Zhou, Y. Chen and X. Ling, "Low-Complexity PTS Scheme for PAPR Reduction in FBMC-OQAM Systems," in IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 11, pp. 2322-2325, Nov. 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2871263.

6. S. Lv, J. Zhao, L. Yang and Q. Li, "Genetic Algorithm Based Bilayer PTS Scheme for Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC/OQAM Signal," in IEEE Access, vol. 8, pp. 17945-17955, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967846.
7. H. Wang, X. Wang, L. Xu and W. Du, "Hybrid PAPR Reduction Scheme for FBMC/OQAM Systems Based on Multi Data Block PTS and TR Methods," in IEEE Access, vol. 4, pp. 4761-4768, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2605008.
8. H. Wang, X. Wang, L. Xu and W. Du, "Hybrid PAPR Reduction Scheme for FBMC/OQAM Systems Based on Multi Data Block PTS and TR Methods," in IEEE Access, vol. 4, pp. 4761-4768, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2605008.
9. Zuev M. Yu. *Kompleksnoye povysheniye effektivnosti radioelektronnykh ustroystv i sistem peredachi informatsii s OFDM na osnove nelineynykh sistem s dinamicheskim khaosom* [Complex improvement of the efficiency of radio electronic devices and information transmission systems with OFDM based on nonlinear systems with dynamic chaos]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy* [Physics of Wave Processes and Radio Systems]. 2022. Vol. 25. № 1. Pp. 55-64. (In Russian).
10. Sivintseva O. A. *Sredstva maskirovaniya informatsii i snizheniya pik-faktora signalov s ortogonalnym chastotnym multipleksirovaniyem na osnove sistem Sprotta* [Means of masking information and reducing the PAPR of signals with orthogonal frequency multiplexing based on Sprott systems]. *Tekhnika sredstv svyazi* [Means of Communications Equipment]. 2024. No. 4 (168). Pp. 47-56. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-47-56. (In Russian).
11. Y. A. Jawhar et al., "A Review of Partial Transmit Sequence for PAPR Reduction in the OFDM Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 18021-18041, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2894527.
12. D. Qu, S. Lu and T. Jiang, "Multi-Block Joint Optimization for the Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC-OQAM Signals," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 61, no. 7, pp. 1605-1613, April 1, 2013, doi: 10.1109/TSP.2013.2239991.
13. Y. Sekiguchi, N. Nonaka and K. Higuchi, "PAPR Reduction Using Null Space in MIMO Channel for MIMO-OFDM Signals in Multiple-Antenna AF Relay Transmission," 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Norman, OK, USA, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625257.
14. I. A. A. Shaheen, A. Zekry, F. Newagy and R. Ibrahim, "Absolute Exponential Companding to Reduced PAPR for FBMC/OQAM," 2017 Palestinian International Conference on Information and Communication Technology (PICICT), Gaza City, 2017, pp. 60-65, doi: 10.1109/PICICT.2017.17.
15. M. A. Aboul-Dahab, M. M. Fouad and R. A. Roshdy, "Generalized Discrete Fourier Transform for FBMC Peak to Average Power Ratio Reduction," in IEEE Access, vol. 7, pp. 81730-81740, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921447.

Статья поступила 18 марта 2025 г.

Информация об авторах

Ишмиев Ильназ Ильгизович – аспирант кафедры электронных и квантовых средств передачи информации (ЭКСПИ). Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов: снижение пик-фактора сигналов в системах связи. Тел.: +7 927 424 91 36. E-mail: ishmiev2000@gmail.com.

Логинов Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры электронных и квантовых средств передачи информации (ЭКСПИ). Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов: динамический хаос. Тел.: +7 905 023 67 99. E-mail: sslogin@mail.ru.

Адрес: 420111, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10.

A means of reducing the peak-to-average power ratio of FBMC signals with variable stopping criteria for phase selection in the PTS method

I. I. Ishmiev, S. S. Loginov

Annotation. FBMC (Filter Bank Multicarrier) signals are characterized by a high peak-to-average power ratio (PAPR), which leads to nonlinear distortions in power amplifiers. **Problem statement:** Comparing PAPR reduction schemes that use two stopping criteria allows for identifying the most efficient one in terms of implementation in FBMC-based communication systems. **Purpose:** The study aims to determine the impact of the stopping criterion on PAPR reduction in FBMC signals using the PTS method, considering the resulting PAPR and entropy characteristics. **Methods:** The study applies algorithms for selecting phase multipliers in the PTS method and calculates PAPR and entropy metrics to evaluate effectiveness. **Novelty:** For the first time, a comparative analysis of the efficiency of PAPR and entropy reduction is conducted using stopping criteria based on entropy and PAPR in the PTS method for FBMC signals, considering variations in the number of windows and iterations. **Results:** The stopping criterion based on PAPR provides a more pronounced effect in the initial steps but requires precise tuning of the number of iterations and windows since further increases in these parameters yield insignificant improvements. In contrast, the entropy-based stopping criterion ensures more stable PAPR reduction, though its effect is less pronounced. **Practical relevance:** The improvement of FBMC signal characteristics enables reduced power consumption and increased efficiency of power amplifiers in next-generation communication systems.

Keywords: multiplex frequency modulation, FBMC, PAPR, PTS method, entropy, peak factor, communication systems.

Information about Authors

Ishmiev Ilnaz Ilgizovich – postgraduate student of the Department of Electronic and Quantum Information Transmission Media, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI. Field of research: reduction of the peak-to-average power ratio of signals in communication systems. Tel.: +7 927 424 91 36. E-mail: ishmiev2000@gmail.com

Loginov Sergey Sergeevich – Doc tor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic and Quantum Means of Information Transmission. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Field of research: dynamic chaos. Tel.: +7 905 023 67 99. E-mail: sslogin@mail.ru

Address: 420111, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx Street, 10.

Для цитирования:

Ишмиев И. И., Логинов С. С. Средство снижения пик-фактора сигналов FBMC с вариативными критериями останова подбора фаз в методе PTS // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 64-71. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-64-71

For citation:

Ishmiev I. I., Loginov S. S. A means of reducing the peak-to-average power ratio of FBMC signals with variable stopping criteria for phase selection in the PTS method. Means of Communication Equipment. 2025. No. 1 (169). Pp. 64-71. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-64-71. (In Russian).

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.391

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-72-83

**Информационно-лингвистическое обеспечение процедур
и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов
на ресурсах дата-центров: анализ и формулировка современных требований**

Владимирова Е. С., Салюк Д. В., Саяркин Л. А., Паращук И. Б.

Аннотация. *Постановка задачи:* всесторонний анализ специфических особенностей, присущих современным процедурам и программно-аппаратным средствам для эффективной реализации поисковых запросов на информационных ресурсах дата-центров. Изучение закономерностей, алгоритмов, структуры (состава), условий применения информационно-лингвистического обеспечения подобных процедур и программно-аппаратных средств, а также формулировка основных требований к подобному виду обеспечения с учетом возможных ограничений и вариантов применения современных алгоритмов информационного поиска. **Новизна:** состоит в том, что объектом исследования являются современные процедуры и программно-аппаратные средства реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров, которые, в свою очередь, служат основой и исходными данными для формулировки и обоснования общих и частных требований по построению и применению элементов информационно-лингвистического обеспечения процедур и систем такого класса. **Целью работы** является анализ существующих и разработка новых подходов, ориентированных на формулировку (синтез) системы современных требований к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров. **Результат:** заключается в том, что предложены и обоснованы частные и общие требования к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и программно-аппаратных средств информационного поиска, описаны физическая сущность и содержание данных требований, а также сформулированы предложения по развитию процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов в части информационно-лингвистического обеспечения. **Практическая значимость:** результаты анализа и предложенный подход к формулировке и обоснованию требований к информационно-лингвистическому обеспечению информационного поиска, с учетом особенностей, присущих информационным ресурсам современных дата-центров, позволяют на основе единых системных позиций сформировать новые, инновационные методы построения и реализации алгоритмов поисковой классификации и кодирования, новые методы формулировки показателей качества информационного поиска и методы назначения поисковых индикаторов, как ключевых элементов информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов.

Ключевые слова: дата-центр, информационно-лингвистическое обеспечение, информационный поиск, информация, требование, программно-аппаратное средство, процедура, реализация поискового запроса, ресурс.

Актуальность

Информационно-лингвистическое обеспечение являются важнейшим компонентом в широком наборе обеспечивающих средств для качественной реализации процессов и эффективного функционирования программно-аппаратных средств (ПАС) информационного поиска на ресурсах современных дата-центров, особенно с учетом специфики анализа Больших Данных, с учетом структуры огромных массивов информации, хранящейся и обрабатываемой в рамках центров обработки данных такого класса [1-5].

Анализ показывает, что наряду с программным, техническим, технологическим обеспечением, информационно-лингвистическое обеспечение не просто существенно, а крайне значительно влияет на технологическую эффективность системы реализации

поисковых запросов на ресурсах дата-центров, а значит, на качество поисково-справочных услуг, оказываемых пользователям центров обработки данных, на оперативность и релевантность поиска и интеллектуального анализа большого количества разнородных и неструктурированных данных [6, 7].

Значимость информационно-лингвистического обеспечения, помимо прочего, обусловлена тем, что любая подсистема информационного поиска, любые программно-аппаратные средства реализации поисковых запросов, включая «поисковые движки» и иные поисково-справочные механизмы современных дата-центров (особенно с учетом специфики анализа информации и поиска на Больших Данных), может успешно функционировать и решать возложенные на нее задачи только тогда, когда в ней:

- во-первых, по определенным правилам существует и циркулирует информация (документы, данные);
- во-вторых, эта информация структурирована и сформирована на основе единых лингвистических средств, например, информационных и информационно-поисковых языков и языков (семантики и синтаксиса) поисковых запросов [5, 8, 9].

Информационно-лингвистическое обеспечение неразрывно связано с иными видами обеспечения, взаимодействует с ними, составляя основу комплекса обеспечивающих механизмов для процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров. Этот вид обеспечения, как совокупность информационных и лингвистических (языковых) средств, выполняет ключевую информационную функцию в интересах автоматизированного информационного поиска, включающую формирование запросов, поиск, обработку и получение информации, обработку и передачу запрошенных данных пользователям.

С точки зрения сугубо лингвистического аспекта информационно-лингвистического обеспечения, ключевым является понятие естественного языка, используемого при общении пользователей и эксплуатационного персонала дата-центров с комплексом программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов – это язык, используемый в центрах обработки данных и иных системах хранения, и предназначенный для представления и преобразования описаний (поисковых запросов и ответов) при функционировании современных информационно-справочных и информационно-поисковых систем такого класса.

Важнейшая задача информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров – организация и обеспечение совместимости всех механизмов, вовлеченных в процесс информационного поиска. Это комплексное, совокупное свойство двух или более процессов (процедур), программно-аппаратных средств или отдельных поисковых механизмов, определяемое их пригодностью к программной и аппаратной взаимной кооперации в целях выполнения требований по оперативности и релевантности информационного поиска [10, 11].

При этом имеется в виду, что программная и аппаратная кооперация процессов, программно-аппаратных средств и механизмов поиска включает их техническую, программную, информационную, организационную, лингвистическую и, при необходимости, процедурно-поисковую совместимость.

Информационно-лингвистическое обеспечение процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров нарабатывает на информационную совместимость, как частную согласованность информационного поиска, характеризующую возможность использования в них одних и тех же информационных аспектов и признаков. Кроме того, данное обеспечение нарабатывает на лингвистическую совместимость, как частную согласованность, характеризующую возможность использования одних и тех же языковых средств в целях выполнения требований по оперативности и релевантности информационного поиска.

В свете этих факторов, особого внимания, на наш взгляд, заслуживают вопросы детального исследования, создания, уточнения и редактирования современных требований к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и ПАС информационного поиска среди огромных массивов данных, хранящихся и обрабатываемых в рамках дата-центров, являющихся, по сути, основой информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, например, для обороноспособности и правопорядка в России [12].

Особую актуальность проблема анализа и формулировки таких требований приобретает сейчас, когда информационно-лингвистическое обеспечение нарабатывает на повышение оперативности и релевантности поиска в период лавинообразного роста объема и номенклатуры информации, которую необходимо хранить и обрабатывать.

Формулировка общих и частных требований к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров

Анализ существующих подходов, ориентированных на отечественные и международные правовые нормы, на постулаты (принципы) системного подхода, применяемые для формирования требований к современным видам обеспечения для сложных информационно-технических систем, позволяет говорить о том, что общие требования к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и ПАС реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров, могут и должны содержать следующие положения (правила) [12, 13]:

- информационно-лингвистическое обеспечение должно быть достаточным для поддержания всех функций, реализуемых в рамках процедур и алгоритмов работы программно-аппаратных средств информационного поиска на ресурсах дата-центров;
- для кодирования и эффективного лингвистического представления информации, используемой в рамках автоматизированного информационного поиска и включающей данные для формирования запросов, поиска, обработки и получения справок-ответов, обработки и передачи запрошенных данных пользователям, должны использоваться классификаторы;
- должна быть гарантирована программная и аппаратная взаимная кооперация, имеющая целью достижение высокого уровня совместимости процедур и ПАС поиска с информационно-лингвистическим обеспечением для всех иных процедур и систем, взаимодействующих с процедурами и ПАС реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров;
- формы поисковых запросов, ответов на запросы и форматы представления языковых средств информационно-лингвистического обеспечения должны отвечать требованиям стандартов информационного поиска (или унифицированной системы реализации поисковых запросов);
- структура поисковых запросов, ответов на запросы, поисковых визуальных интерфейсов (экранных форм) и форматов представления языковых средств информационно-лингвистического обеспечения должна соответствовать характеристиками терминалов на рабочих местах конечных пользователей, в интересах которых осуществляется реализация поисковых запросов на ресурсах дата-центров;
- графики формирования и содержание поисковых запросов и ответов на запросы (информационных сообщений), экранных форм и форматов представления языковых средств информационно-лингвистического обеспечения, используемые формализованные сокращения слов и словосочетаний, должны быть конвенциональны для конкретной сферы знаний и данных, и скоординированы с заказчиком;
- в архитектуре ПАС для реализации поисковых запросов необходимо предусмотреть наличие средств мониторинга входной и результатной информации

(ответов на запросы), средств актуализации данных в единых высокопроизводительных массивах дата-центров, а также средств и алгоритмов контроля целостности массивов данных, средств защиты дата-центров и ПАС информационного поиска от несанкционированного доступа.

С точки зрения анализа и формулировки частных требований к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров, предполагается целесообразным, по нашему мнению, чтобы в их состав входили:

- требования к составу и структуре информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров;
- к разработке и обоснованию технологий взаимодействия компонентов информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров;
- к разработке и обоснованию алгоритмов и методик применения компонентов информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров;
- к надежности, точности и времени решения практических задач с помощью компонентов информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств информационного поиска;
- к ресурсам памяти дата-центров и к телекоммуникационным ресурсам программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов, выделяемым для работы информационно-лингвистического обеспечения;
- к модульности и гибкости такого вида обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов – информационно-лингвистическое обеспечение должно иметь модульную структуру и быть открытым для дальнейшего развития;
- к применимости (нормативы адаптации) информационно-лингвистического обеспечения к составу и состоянию программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов;
- к преемственности – обеспечение возможности использования ранее разработанных элементов информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов;
- к сертификации такого вида обеспечения – элементы (компоненты) информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов должны быть сертифицированы уполномоченными организациями для использования на ресурсах современных дата-центров;
- к актуальности (адекватности времени) информационно-лингвистического обеспечения;
- к независимости от компьютерных средств на дата-центрах и терминалах пользователей (мобильности, переносимости, кроссплатформенности), использующих подобный тип обеспечения – элементы (компоненты) информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов должны быть независимы от используемых средств техники и операционных сред, т. е. должна быть обеспечена переносимость информационно-лингвистического обеспечения;
- к надежности такого вида обеспечения – элементы (компоненты) информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов должны обладать высокой надежностью и устойчивостью к ошибкам пользователя;

- к универсальности средств подобного типа обеспечения информационного поиска – инструментальные средства информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных комплексов реализации поисковых запросов, кроме стандартных языков и данных, должны включать средства их корректировки, хранения и выдачи данных и языковых парадигм;
- к документации этого вида обеспечения предопределяют, что вся документация на информационно-лингвистическое обеспечение процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов должна содержать все сведения, необходимые персоналу для использования;
- к использованию перспективных языковых и информационных технологий для информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов;
- к использованию стандартных средств информационного обеспечения и языков описания;
- к импортозамещению элементов подобного типа обеспечения – информационные и языковые средства, а также все информационно-лингвистическое обеспечение процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов, должно быть, преимущественно, отечественного производства.

Анализ рассмотренных требований и условий их реализации показывает, что некоторые общие приемы, способы и предложения по усовершенствованию, связанные с разработкой и эффективной организацией информационно-лингвистического обеспечения механизмов поиска, необходимо конкретизировать.

Это обусловлено жесткой взаимозависимостью предлагаемых новых приемов, способов и предложений, всех иницируемых процедур поиска и вновь создаваемых, инновационных программно-технологических схем реализации поисковых запросов на ресурсах современных дата-центров. Более того, это, главным образом, обусловлено тем фактом, что информационно-лингвистическое обеспечение процедур и ПАС информационного поиска устанавливает (определяет) как коммуникативные и внутрисистемные форматы поиска, выдачи и обработки информации, так и подходы к построению систем классификации и индексирования форматов запросов, используемых для автоматизированного поиска, подходы к обработке таких запросов, а также комплекс словарно-тезаурусной поддержки и лингвистических процессоров,

Некоторые предложения по развитию процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов в части информационно-лингвистического обеспечения

Известно, что целенаправленное улучшение характеристик, расширение функционала информационно-лингвистического обеспечения с точки зрения повышения оперативности и релевантности информационного поиска на ресурсах современных дата-центров, традиционно понимается, как процесс развития процедур и ПАС реализации поисковых запросов [8, 12].

В этой связи, и учитывая рассмотренные ранее подходы к созданию, уточнению и редактированию современных требований к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и ПАС информационного поиска, представляется очевидным, что информационно-лингвистическое обеспечение подобных процедур и средств – это комплекс (конгломерат) систем, средств и методов: системы кодирования и классификации информации, искомой и хранимой на ресурсах современных дата-центров; массивов контрольных данных о состоянии процедур и ПАС информационного поиска; множества параметров (показателей) и метрик (индикаторов) оценки подобных процедур и средств; унифицированных систем документации и организации обмена данными в рамках процедур

и ПАС реализации поисковых запросов; поисковых каталогов, словарей и правил для формализации языка запросов, используемых при информационном поиске, и, безусловно, методологии построения поисковых алгоритмов и баз данных.

Помимо этого, ясное и однозначное понимание смысла, семантики и синтаксиса термина и концепции «информационно-лингвистическое обеспечение» информационного поиска, позволяет даже неискушенному исследователю сформулировать ряд предложений, нацеленных на совершенствование процедур и ПАС реализации поисковых запросов в части именно этого вида обеспечения, на конкретные задачи по улучшению качества поиска в целях выполнения современных жестких требований по его оперативности и релевантности:

- модернизация тезауруса языка запросов и совершенствование предметных поисковых рубрик в рамках повышения качества информационно-лингвистического обеспечения процедур и ПАС реализации поисковых запросов;
- доработка и совершенствование цифровых каталогов хранения современных дата-центров, что позволит вывести информационно-лингвистическое обеспечение и сам поиск информационных объектов на ресурсах современных дата-центров на качественно новый уровень, соответствующий уровню цифровой трансформации государства;
- реформирование (оптимизация) перечня целей и частных задач информационно-лингвистического обеспечения для поддержки и развития сферы информационного поиска, доработка и усовершенствование метрик и критериев оценки достижения конкретной цели из такого перечня, синтез рациональной по составу и безыбыточной системы показателей и индикаторов оценки искомых информационных объектов на ресурсах современных дата-центров;
- развитие (совершенствование) системы селекции и обоснованного выбора действующих и сопровождаемых поисковых классификаторов для информационно-лингвистического обеспечения информационного поиска, дальнейшая интеграция с общероссийскими поисковыми классификаторами;
- разработка новых современных локальных поисковых классификаторов для совершенствования информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах современных дата-центров;
- поиск, модификация и адаптация к существующим условиям инновационных способов и механизмов поисковой каталогизации и классификации, ориентируясь уже на перспективную систему информационного поиска;
- создание и совершенствование новых, перспективных форм цифровых документов, что позволит повысить эффективность реализации поисковых запросов;
- модернизация цифровой системы поиска документов на ресурсах современных дата-центров, доведение ее до уровня, соответствующего уровню цифровой трансформации государства;
- разработка новых инфологических цифровых моделей объектов информационно-лингвистического обеспечения и конкретных типов искомых информационных объектов на ресурсах современных дата-центров, совершенствование логических и физических структур алгоритмов поиска и баз данных в рамках информационно-лингвистического обеспечения;
- развитие (совершенствование) мультилингвистичности информационно-лингвистического обеспечения, т. е., многообразия (расширения диапазона) применяемых современных и перспективных языковых средств для представления и решения задач формирования многоязычного информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов и для распределенных систем поддержки принятия решений в рамках информационного поиска;

- развитие (совершенствование) новых подходов к построению информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов в условиях интеграции и цифровой трансформации информационных систем, центров обработки данных, систем связи и автоматизации.

Все это, в конечном итоге, должно способствовать созданию концепции и формированию этапов новой методологии информационно-лингвистического обеспечения процедур и ПАС реализации поисковых запросов, как единой, взаимоувязанной совокупности методов поисковой каталогизации, классификации, кодирования и инфологического моделирования информационного поиска, адаптированной к современным условиям.

Исходя из рассмотренных ранее особенностей и состава подобного вида обеспечения, рассмотрим направления и предложения по совершенствованию процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов в части информационно-лингвистического обеспечения, с точки зрения совершенствования этапов и элементов этих процессов и средств.

Возможными направлениями и предложениями по развитию алгоритмов поиска и массивов данных о состоянии информационных объектов на ресурсах современных дата-центров, как важных элементов такого вида обеспечения, является создание новых современных цифровых (электронных) паспортов объектов информационно-лингвистического обеспечения, цифровых (электронных) отчетных, организационных и распорядительных документов. В интересах Для структурирования массивов данных о состоянии конкретных типов искомых информационных объектов на ресурсах дата-центров, могут и должны быть применены современные интеллектуальные технологии поисковой каталогизации, способы классификации таких объектов и кодирования поисковых запросов.

Одним из предложений по развитию системы показателей качества информационного поиска и поисковых индикаторов, как элементов информационно-лингвистического обеспечения процедур и ПАС реализации поисковых запросов, может выступать синтез оптимальных, безызыточных и непротиворечивых поисковых показателей, шкал и метрик (индикаторов) оценки информационных объектов, размещаемых в центрах обработки данных. Этот синтез должен учитывать не только современный уровень информационного обеспечения и информационных технологий, но и новые принципы, способы и приемы информационного противоборства в цифровом пространстве.

Важной особенностью синтеза системы показателей качества информационного поиска и поисковых индикаторов является объективная необходимость учета корреляционных связей и взаимозависимостей между текущими и долгосрочными целями реализации поисковых запросов. Более того, подобная взаимозависимость будет проявляться и в рамках иных подпроцессов единого информационного процесса, нацеленного на поддержку принятия решений по управлению государством. Подобные корреляционные связи и взаимозависимость целей будут определять систему критериев для оценки степени их достижения с помощью процесса информационного поиска.

Процесс привлечения интеллектуальных технологий поисковой классификации – процесса систематизированного распределения на определенные кластеры, группы, классы, разряды (исходя из их сходства и различий) информационных явлений и объектов, хранящихся на ресурсах современных дата-центров, может оказаться знаковым, нетривиальным и, главное, эффективным решением в рамках развития единой системы классификации и кодирования информации (в интересах эффективной реализации поисковых запросов). Результатом внедрения интеллектуальных технологий поисковой классификации должен выступить новый современный поисковый классификатор, представляющий собой разбитый на рубрики и оцифрованный каталог информационных

явлений и объектов, хранящихся на ресурсах современных дата-центров, каждому из которых присваивается определенный код [12, 13].

При этом важен принцип единства развития – принцип взаимоувязанного совершенствования поисковых классификаторов и используемых правил кодирования информационных явлений и объектов, хранящихся на ресурсах современных дата-центров, что позволит, в конечном итоге, создать новую, цифровую систему поисковой классификации и кодирования информации в интересах эффективной реализации поисковых запросов. Применение инновационных, усовершенствованных на основе новых информационных технологий, технологий Больших Данных и искусственного интеллекта, систем поисковой классификации обеспечит однозначность формулировки поисковых запросов, единство восприятия информации, а также единообразие подходов к реализации процессов ее поиска, позволит обеспечить уменьшение финансовых издержек на создание и эксплуатацию поисковых алгоритмов и систем, что, в конечном итоге, позволит повысить эффективность функционирования систем информационного поиска.

Важным частным аспектом совершенствования информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств информационного поиска, является развитие такой существенной части такого вида обеспечения, как система поискового кодирования. Данная система позволяет обеспечить своевременность формирования поисковых запросов и повысить оперативность поиска в целом, заменяя в автоматическом режиме названия информационных явлений и объектов, хранящихся на ресурсах современных дата-центров, на их условные кодовые обозначения. Также потенциально важным предложением по развитию информационно-лингвистического обеспечения, в части совершенствования еще одного важного элемента такого вида обеспечения – баз и хранилищ данных, составляющих основу современных дата-центров, является формирование новых, перспективных технологических и методологических подходов к их построению.

Выводы

Всесторонний и детальный анализ особенностей, присущих современным процедурам и программно-аппаратным средствам для эффективной реализации поисковых запросов на информационных ресурсах дата-центров показывает, что информационно-лингвистическое обеспечение подобных процедур и программно-аппаратных средств является важнейшим из видов обеспечения. Вместе с тем, необходимо признать, что пока не решена на должном теоретическом, методологическом и практическом уровне задача формулировки основных требований к подобному виду обеспечения с учетом возможных ограничений и вариантов применения современных алгоритмов информационного поиска, с учетом закономерностей, алгоритмов, структуры (состава) и условий применения отдельных процедур и программно-аппаратных средств.

Принимая во внимание эти обстоятельства, осуществлена попытка сформулировать и обосновать систему современных требований к информационно-лингвистическому обеспечению процедур и ПАС реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров. Ожидается, что сформулированные и обоснованные частные и общие требования к информационно-лингвистическому обеспечению позволят по новому, с единых системных позиций, взглянуть на физическую сущность процедур и программно-аппаратных средств информационного поиска, позволят описать такие аспекты подобного вида обеспечения, которые изменят представление о роли и месте реализации поисковых запросов в структуре процесса поддержки принятия решений должностными лицами.

Определены и сформулированы предложения по развитию процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов в части информационно-лингвистического обеспечения. Полученные результаты анализа и предложенный подход к

формулировке и обоснованию требований к информационно-лингвистическому обеспечению информационного поиска, с учетом особенностей, присущих информационным ресурсам современных дата-центров, позволяют сформировать новые, высокотехнологичные методы построения и реализации алгоритмов поисковой классификации и кодирования, новые методы формулировки показателей качества информационного поиска и инновационные методы назначения поисковых индикаторов, как ключевых элементов информационно-лингвистического обеспечения процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов.

Литература

1. Прохоров А. Н., Рахматуллин С. А. Центры обработки данных: анализ, тренды, мировой опыт: корпоративное издание / научное редактирование: К. Королев, И. Дорофеев. – М.: АльянсПринт, 2021. 414 с.
2. Нагорный К. Д., Чеснов А. А., Чирков Т. А. Эксплуатация ЦОД: Практическое руководство. – М.: Альпина ПРО, 2024. 320 с.
3. Паращук И. Б., Михайличенко Н. В. Эффективность современных центров обработки данных // III Межрегиональная научно-практическая конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». Материалы конференции, – Севастополь: СевГУ, 2017. С. 24–26.
4. Саяркин Л. А., Паращук И. Б., Владимирова Е. С. Этапы и особенности разработки методики повышения качества информационного поиска на ресурсах современных центров обработки данных с использованием нечетких отношений предпочтения и сравнения альтернатив // Информация и космос. 2024. № 1. С. 38–45.
5. Паращук И. Б. Проблемы Больших Данных. Особенности и пути решения // IX-ая Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России – 2015 (ИБРР–2015)». Материалы конференции. – СПб.: СПОИСУ, 2015. С. 175–176.
6. Елизаров В. В., Паращук И. Б., Салюк Д. В. Обоснование требований к программно-аппаратным комплексам специального назначения для сбора и обработки информации на основе методов интеллектуального анализа большого количества разнородных и неструктурированных данных // Техника средств связи. 2024. № 1 (165). С. 76–89. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-1-76-89.
7. Попков Ю. А., Осадчий А. И., Чирушкин А. Н. Своевременная и качественная реализация поисковых запросов с использованием высокоскоростных защищенных каналов и трактов ведомственных телекоммуникационных сетей // Региональная информатика (РИ–2024). XIX Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2024)». Санкт-Петербург, 23-25 октября 2024 г.: Материалы конференции. \ СПОИСУ. – СПб.: 2024. С. 76–78.
8. Купцов А. Б., Майоров А. А., Соловьев И. В., Шкуров Ф. В. Разработка концептуальной модели информационно-лингвистического обеспечения компьютерной системы для обучения геоинформационным технологиям специалистов картографо-геодезического профиля методом компьютерной деловой игры // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008, № 6. С. 12–24.
9. Майоров А. А., Соловьев И. В., Шкуров Ф. В., Дубов С. С. О разработке информационно-лингвистического обеспечения процесса управления имущественным комплексом Минобрнауки России // Современные проблемы науки образования. 2013, № 2. С. 144–151.
10. Скарук Г. А. Комплексное использование лингвистических средств тематического поиска в электронном каталоге // Библиотекосведение. 2010, № 2. С. 34–40.
11. Гуслякова А. В. Информационные технологии и лингвистика XXI века: учебное пособие. – М.: МПГУ, 2016. 96 с.
12. Балыбердин В. А., Белевцев А. А., Степанов О. А. Об оценке компонентов информационного и лингвистического обеспечения АСУ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 5, С. 34–40.
13. Башкирцев А. С., Малофеев В. А., Паращук И. Б. Формулировка современных требований к техническому и иным видам обеспечения автоматизированных систем специального назначения // V Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». Труды конференции. (20 марта 2020 г., г. Санкт-Петербург). – СПб.: ВАС, 2020. С. 73–76.

References

1. Proxorov A. N., Raxmatullin S. A. *Centry obrabotki dannyx: analiz, trendy, mirovoj opyt: korporativnoe izdanie* [Data centers: analysis, trends, global experience: corporate publication]. Moscow. Al'yansPrint publ., 2021. 414 p. (In Russian).
2. Nagornyj K. D., Chesnov A. A., Chirkov T. A. *E'kspluatatsiya CzOD: Prakticheskoe rukovodstvo* [Data Center Operation: A Practical Guide]. Moscow. Al'pina PRO publ., 2024. 320 p. (In Russian).
3. Parashchuk I. B., Mixajlichenko N. V. *E'ffektivnost' sovremennyx centrov obrabotki dannyx* [Efficiency of modern data centers]. *III Mezhhregional'naya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Perspektivny'e napravleniya razvitiya otechestvennyx informacionnyx texnologij». Materialy konferencii. Sevastopol'. SevGU* [III Interregional scientific and practical conference "Promising areas of development of domestic information technologies". Conference Materials, Sevastopol. SevGU]. 2017. Pp. 24–26. (In Russian).
4. Sayarkin L. A., Parashchuk I. B., Vladimirova E. S. *E'tapy i osobennosti razrabotki metodiki povysheniya kachestva informacionnogo poiska na resursax sovremennyx centrov obrabotki dannyx s ispol'zovaniem nechetkix otnoshenij predpochteniya i sravneniya al'ternativ* [Stages and features of developing a methodology for improving the quality of information retrieval on the resources of modern data processing centers using fuzzy relations of preference and comparison of alternatives]. *Informatsiya i kosmos* [Information and space]. 2024. № 1. Pp. 38–45. (In Russian).
5. Parashchuk I. B. *Problemy Bol'shix Dannyx. Osobennosti i puti resheniya* [Big Data Problems. Features and Solutions]. *IX-aya Sankt-Peterburgskaya mezhhregional'naya konferenciya «Informacionnaya bezopasnost' regionov Rossii – 2015 (IBRR–2015)». Materialy konferencii* [IX St. Petersburg Interregional Conference "Information Security of Russian Regions – 2015 (IBRR–2015)". Conference materials]. Saint Petersburg. SPOISU-2015. Pp. 175–176. (In Russian).
6. Elizarov V. V., Parashchuk I. B., Salyuk D. V. Justification of requirements for special-purpose hardware and software systems for collecting and processing information based on methods of intelligent analysis of large amounts of heterogeneous and unstructured data. *Means of Communication Equipment*. 2024. № 1 (165). Pp. 76–89. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-76-89.
7. Popkov Yu. A., Osadchij A. I., Chirushkin A. N. *Svoevremennaya i kachestvennaya realizatsiya poiskovyx zaprosov s ispol'zovaniem vy'sokoskorostnyx zashchishhennyx kanalov i traktov vedomstvennyx telekommunikacionnyx setej* [Timely and high-quality implementation of search queries using high-speed secure channels and paths of departmental telecommunications networks]. *Regional'naya informatika (RI–2024). XIX Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferenciya «Regional'naya informatika (RI-2024)». Sankt-Petersburg, 23-25 oktyabrya 2024 g.: Materialy konferencii* [Regional Informatics (RI–2024). XIX St. Petersburg International Conference "Regional Informatics (RI-2024)". St. Petersburg, October 23-25, 2024. Conference proceedings. St. Petersburg]. SPOISU. St-Petersburg. 2024. Pp. 76–78. (In Russian).
8. Kupczov A. B., Majorov A. A., Solov'ev I. V., Shkurov F. V. *Razrabotka konceptual'noj modeli informacionno-lingvisticheskogo obespecheniya komp'yuternoj sistemy dlya obucheniya geoinformacionny'm texnologiyam specialistov kartografo-geodezicheskogo profilya metodom komp'yuternoj delovoj igry* [Development of a conceptual model of information and linguistic support for a computer system for teaching geoinformation technologies to cartographic and geodetic specialists using a computer business game]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* [News of universities. Geodesy and aerial photography]. 2008, № 6. Pp. 12–24. (In Russian).
9. Majorov A. A., Solov'ev I. V., Shkurov F. V., Dubov S. S. *O razrabotke informacionno-lingvisticheskogo obespecheniya processa upravleniya imushchestvenny'm kompleksom Minobrnauki Rossii* [On the development of information and linguistic support for the process of managing the property complex of the Ministry of Education and Science of Russia]. *Sovremennye problemy nauki obrazovaniya* [Modern problems of science education]. 2013, № 2. Pp. 144–151. (In Russian).
10. Skaruk G. A. *Kompleksnoe ispol'zovanie lingvisticheskix sredstv tematicheskogo poiska v e'lektronnom kataloge* [Integrated use of linguistic means of subject search in the electronic catalogue]. *Bibliotekovedenie* [Library Science]. 2010, № 2. Pp. 34–40. (In Russian).
11. Guslyakova A. V. *Informacionny'e texnologii i lingvistika XXI veka* [Information technology and linguistics of the 21st century]. Moscow. MPG U, 2016. 96 p. (In Russian).
12. Baly'berdin V. A., Belevcev A. A., Stepanov O. A. *Ob ocenke komponentov informacionnogo i lingvisticheskogo obespecheniya ASU* [On the assessment of components of information and linguistic

support of automated control systems]. *Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki* [News of SFedU. Technical sciences]. № 5, 2013. Pp. 34–40. (In Russian).

13. Bashkircev A. S., Malofeev V. A., Parashchuk I. B. *Formulirovka sovremennykh trebovaniy k texnicheskomu i inym vidam obespecheniya avtomatizirovannykh sistem special'nogo naznacheniya* [Formulation of modern requirements for technical and other types of support for automated systems for special purposes]. *V Mezhvuzovskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Problemy texnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh». Trudy konferencii* [V Interuniversity scientific and practical Conference "Problems of technical support of troops in modern conditions". Proceedings of the conference. (March 20, 2020, St. Petersburg)]. St-Petersburg. Military Academy of Communications publ., 2020. Pp. 73–76. (In Russian).

Статья поступила 15 января 2025 г.

Информация об авторах

Владимирова Елена Сергеевна – старший преподаватель кафедры (информационных технологий и компьютерных систем) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Севастопольский государственный университет». Область научных интересов: анализ качества и эффективности функционирования современных информационных и компьютерных систем. Тел.: +7 978 748 57 43. E-mail: lena_vladimir@mail.ru

Салюк Дмитрий Владиславович – кандидат технических наук, доцент. Начальник отдела ПАО «Интелтех». Область научных интересов: проектирование и разработка автоматизированных систем специального назначения; технологии сбора и обработки информации. Тел.: +7 921 794 10 64. E-mail: salukdv@rambler.ru

Саяркин Леонид Андреевич – адъюнкт кафедры (автоматизированных систем специального назначения) Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: методы, алгоритмы, программно-аппаратные средства и комплексы информационного поиска на ресурсах больших хранилищ данных и дата-центров специального назначения. Тел.: +7 999 677 96 01. E-mail: leonid.sayarkin@yandex.ru

Паращук Игорь Борисович – доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель Российской Федерации, почетный работник сферы образования Российской Федерации. Профессор кафедры (автоматизированных систем специального назначения) Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг информационных и телекоммуникационных систем; сетевые технологии; комплексы и средства защиты информации. Тел.: +7 911 944 36 88. E-mail: shchuk@rambler.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Information and linguistic support of procedures and hardware and software for implementing search queries on data center resources: analysis and formulation of modern requirements

E. S. Vladimirova, D. V. Salyuk, L. A. Sayarkin, I. B. Parashchuk

Annotatio. Task statement: a comprehensive analysis of specific features inherent in modern procedures and hardware and software for efficient implementation of search queries on the information resources of data centers. Study of patterns, algorithms, structure (composition), conditions of application of information and linguistic support of such procedures and hardware and software, as well as formulation of basic requirements for this type of support taking into account possible limitations and options for applying modern information retrieval algorithms. **Novelty:** consists in the fact that the object of the study is modern procedures and hardware and software for implementing search queries on the resources of data centers, which, in turn, serve as the basis

and initial data for formulating and justifying general and specific requirements for the construction and application of elements of information and linguistic support for procedures and systems of this class. **The purpose** of the work is to analyze existing and develop new approaches aimed at formulating (synthesising) a system of modern requirements for information and linguistic support of procedures and hardware and software for implementing search queries on the resources of data centers. **Result:** consists in the fact that particular and general requirements for information and linguistic support of procedures and hardware and software of information retrieval are proposed and substantiated, the physical essence and content of these requirements are described, and proposals are formulated for the development of procedures and hardware and software for implementing search queries in terms of information and linguistic support. **Practical significance:** the results of the analysis and the proposed approach to the formulation and substantiation of requirements for information and linguistic support of information retrieval, taking into account the features inherent in the information resources of modern data centers, allow, on the basis of unified system positions, to form new, innovative methods for constructing and implementing algorithms for search classification and coding, new methods for formulating quality indicators of information retrieval and methods for assigning search indicators as key elements of information and linguistic support of procedures and hardware and software for implementing search queries.

Keywords: information and linguistic support, requirement, procedure, software and hardware, data center, information retrieval, implementation of search query, resource, information.

Information about Authors

Vladimirova Elena Sergeevna – Senior Lecturer of the Department (Information Technologies and Computer Systems) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education “Sevastopol State University”. Research interests: analysis of the quality and efficiency of modern information and computer systems. Tel.: +7 978 748 57 43. E-mail: lena_vladimir@mail.ru.

Salyuk Dmitry Vladislavovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Head of the Department of PJSC «Inteltech». Research interests: design and development of automated systems for special purposes; technologies for collecting and processing information. Tel.: +7 921 794 10 64. E-mail: salukdv@rambler.ru.

Sayarkin Leonid Andreevich – Adjunct of the Department (Automated Special purpose Systems) of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: methods, algorithms, software and hardware tools and information retrieval systems on the resources of large data warehouses and special-purpose data centers. Tel.: +7 999 677 96 01. E-mail: leonid.sayarkin@yandex.ru.

Parashchuk Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation. Professor of the Department (Automated Special purpose Systems) of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: monitoring of information and telecommunication systems; network technologies; complexes and means of information protection. Tel.: +7 911 944 36 88 . E-mail: shchuk@rambler.ru. Address: Russia, 197342, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya St. 8.

Для цитирования:

Владимирова Е. С., Салюк Д. В., Саяркин Л. А., Паращук И. Б. Информационно-лингвистическое обеспечение процедур и программно-аппаратных средств реализации поисковых запросов на ресурсах дата-центров: анализ и формулировка современных требований // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 72-83. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-72-83

Reference for citation:

Vladimirova E. S., Salyuk D. V., Sayarkin L. A., Parashchuk I. B. Information and linguistic support of procedures and hardware and software for implementing search queries on data center resources: analysis and formulation of modern requirements. Means of Communication Equipment. 2025. Nº. 1 (169). Pp. 72-83. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-72-83

УДК 004.94(07)

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-84-97

Анализ качества реконструкции бизнес-процессов с помощью языковой модели ChatGPT

Буравлев А. С., Демидова Д. Е., Ткачева Е. А.

Аннотация. *Разработку программного обеспечения сложно представить без инструментов автоматизации рутинной деятельности, не малая часть которой приходится на формализацию требований с помощью графических языков моделирования процессов. Преобразование текстовой информации в формализованные процессы занимает много времени бизнес-аналитиков, большая часть которого может быть направлена и на другие важные задачи, в число которых входит как согласование постановок задач с заказчиками, так и с разработчиками. Решением поставленной проблемы может стать применение стремительно развивающихся нейросетевых инструментов, предназначенных для обработки естественного языка. Целью данного исследования является анализ возможностей повы-*

шения эффективности трудовой деятельности бизнес-аналитиков в части реконструкции бизнес-процессов с помощью языковой модели ChatGPT 4.0. Научная новизна работы заключается в получении ранее неизвестных результатов эффективности ChatGPT для реконструкции отдельных проекций бизнес-процессов (поток управления, данные, ресурсы, операции) на основании изучения результатов реконструкции 54 коротких пользовательских сценариев с последующим сравнительным анализом с существующим подходом реконструкции процессов на основе правил грамматики зависимостей. Практическая значимость исследования обусловлена возможностью использования полученных данных для уточнения схем обработки пользовательских историй. В работе решаются следующие задачи: анализ архитектуры и возможностей модели ChatGPT 4.0 в части обработки естественного языка, разработка методики оценки качества реконструкции бизнес-процессов, экспериментальная оценка качества реконструкции, получение статистических оценок, сравнительный анализ с существующим подходом на основе правил грамматики зависимостей. Для достижения поставленных задач в работе используется аппарат статистической обработки данных, экспертного анализа, прикладной лингвистики и нейронных сетей.

Ключевые слова: *бизнес-процесс, обработка естественного языка, иллюзы, нейронные сети, модель трансформер, языковые модели, ChatGPT*

1. Введение

Текущий курс развития информационных систем [1, 2] характеризуется переходом от данных к процессам. В центре автоматизации теперь находятся не структуры и модели данных, а бизнес-процессы как основа управления. Концентрация на целях предприятия и способах их достижения в рамках данного подхода позволяет учитывать изменения в автоматизируемых системах, а фиксированные характеристики объектов отодвинуть на второй план.

Создание процессов основано на автоматизации набора рутинных задач и контроле их выполнения сотрудниками, что позволяет объединять информационные системы и подразделения в виде единого бизнес-процесса. Результатом такого объединения является повышение качества коммуникации между сотрудниками и ускорение достижения целей компании. Внедрение бизнес-процессов в производственную среду упрощает выполнение сразу нескольких функций менее квалифицированными сотрудниками, тем самым увеличивая общую эффективность деятельности компании.

В производственной среде бизнес-процессы создаются бизнес-аналитиками на основе анализа нормативной документации и опросов сотрудников. Чаще всего они представлены в виде некоторого набора сценариев (пользовательских историй), формализация которых

осуществляется с использованием языков моделирования, таких как *BPMN* или *IDEF*. Процессы являются гибкими и подлежат доработке в случае изменения требований автоматизации.

Однако формализация пользовательских историй зачастую требует высокой квалификации от бизнес-аналитика, поскольку представляет собой трудоемкую задачу. Для ее решения существует множество подходов обработки естественного языка с различной степенью автоматизации, основанных как на обнаружении в тексте «характерных шаблонов» элементов, так и на формировании некоторого промежуточного представления [2].

На этом фоне стремительное развитие методов обработки естественного языка (*NLP*) открывает новые возможности для автоматизации подобных задач. Появление архитектуры *Transformer*, представленной в работе "*Attention is All You Need*" [3], стало ключевым этапом в развитии *NLP*, а её внедрение в модели нового поколения, такие как *ChatGPT* [4], кардинально изменило подход к обработке текстовой информации. *ChatGPT* продемонстрировал возможность преобразования неструктурированного текста в структурированные данные, что делает его полезным инструментом для анализа пользовательских историй и моделирования бизнес-процессов.

ChatGPT уже нашел широкое применение в различных областях. В образовании он используется для помощи в обучении, составления материалов и объяснения сложных концепций. В программировании модель помогает исправлять код, генерировать алгоритмы и документировать проекты. В сфере автоматизации бизнес-процессов *ChatGPT* поддерживает анализ текстовых данных, моделирование процессов и создание сценариев. Примечательно его применение в креативных индустриях для генерации контента, а также в медицинской сфере, где он упрощает работу с документацией и поддерживает исследовательские процессы. Интеграция *ChatGPT* в продукты, такие как *Microsoft Copilot* и *Khan Academy*, подчеркивает его практическую значимость и эффективность.

Методология создания процессов из текстовых сценариев включает несколько этапов [2]:

1) *Определение границ процесса* – выявление событий, запускающих процесс, и определение его возможных результатов.

2) *Определение действий* – установление элементарных операций, задействованных в процессе.

3) *Определение ресурсов и порядка передачи управления* – идентификация участников процесса (компаний, отделов и других зон ответственности), определение ролей и последовательности смены исполнителей.

4) *Определение потока управления* – установление порядка выполнения действий, включая параллельные, условные и циклические сценарии.

5) *Добавление дополнительных элементов* – расширение модели за счет включения объектов, с которыми связаны элементарные операции (например, изделия, документы и т. д.).

В данной работе при условии, что границы процесса являются заданными пользовательской историей (по этапу 1) был поставлен эксперимент по оценке реконструкции модели процесса (этапы 2-5) с помощью языковой модели *ChatGPT 4.0* на основании 54 коротких пользовательских сценариев (до 300 слов). Произведён сравнительный анализ качества реконструкции этапов 2-5 с результатами применения подхода на основе правил выделения элементов из дерева, построенного на основе формируемой автоматически грамматики зависимостей [2]. Эксперимент направлен на проверку авторами гипотезы о наличии у языковых моделей (на примере *ChatGPT 4.0*) возможностей реконструкции модели процесса с сопоставимой или повышенной точностью по сравнению с другими известными методами обработки естественного языка, даже

в условиях ограниченных и фрагментированных входных данных. Работа состоит из введения, трех разделов и заключения.

В разделе 2 приводится краткое описание языковой модели *ChatGPT*, приводится обоснование использования модели в контексте данной работы, а также преимущества ее использования по сравнению с существующими подходами (англоязычными) по использованию средств обработки естественного языка для выделения элементов описания бизнес-процессов, представленными в табл. 1 источника [2].

В разделе 3 описана постановка эксперимента по оцениванию реконструкции этапов 2-5, т. е. выделение действий, шлюзов, ресурсов и модели потока выполнения бизнес-процесса на основе языковой модели *ChatGPT*.

В разделе 4 приводятся результаты экспериментального исследования и сравнительный анализ с подходом, предложенным в источнике [2].

2. Описание языковой модели *ChatGPT*

ChatGPT – является языковой моделью, разработанной компанией *OpenAI*. Механизм работы модели основан на вероятности появления следующего слова в заданной последовательности и генерации текста на основе входных данных.

2.1. Архитектура трансформер

Языковые модели, такие как *ChatGPT*, разработаны на основе архитектуры трансформера, которая позволяет эффективно анализировать и генерировать текст. Поскольку основной задачей большинства языковых моделей является предсказание следующего слова (токена), в них используется только часть модели трансформера, а именно, Декодер. Модель Архитектуры *ChatGPT* представлена на рис. 1.

Переходя на слой вложений, входная последовательность токенов преобразуются в векторы фиксированной размерности с использованием эмбеддингов. Эти векторы содержат информацию о семантических и синтаксических свойствах токенов. Позиционные кодировки добавляют к эмбеддингам информацию о порядке токенов в последовательности.

Полученные данные проходят через слой исключения нейронов, где некоторые элементы могут случайно «отключаться» для предотвращения переобучения. Тогда попадая на первый слой трансформер-блока, нормализованные эмбеддинги с учетом их позиции обрабатываются через механизмы внимания (вычисляется вес для каждого токена относительно всех остальных. Этот вес показывает, насколько сильно один токен влияет на другой) и полносвязные слои в векторное представление последовательности токенов.

На следующих итерациях данные последовательно передаются через несколько слоев трансформер-блоков, где каждый слой уточняет представление токенов, учитывая контекст всей последовательности. Итоговое векторное представление, полученное на выходе последнего блока трансформера, масштабируется и центрируется на слое нормализации, тем самым стабилизируя данные для их следующей обработки в виде нормализованного представления токенов.

Проходя, через линейный слой, токены преобразуются в логиты – числовые значения, которые определяют «важность» каждого токена в выходном пространстве. Слой *Softmax* преобразует логиты в вероятности для каждого токена в словаре. Эти вероятности используются для выбора следующего токена в последовательности. На конечном этапе, на основании вероятностей выбирается токен, который будет следующим в последовательности.



Рис. 1. Архитектура языковой модели ChatGPT

2.1.1. Механизм внимания (Attention)

Attention – это ключевой компонент архитектуры трансформера [3]. Он позволяет модели фокусироваться на наиболее значимых частях текста. *Attention* вычисляет вес для каждого токена относительно всех остальных. Этот вес показывает, насколько сильно один токен влияет на другой. Формула (1) вычисления *Attention* представлена ниже:

$$Attention(Q, K, V) = \text{soft max} \left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right) V \quad (1)$$

В данном случае для формирования общего представления о механизме работы целесообразно дать детализированное описание задействованных в формуле параметров:

- a) Q – матрица запросов размерности $n \times d_k$, где n — число токенов в последовательности, d_k – размерность вектора запроса. Каждый токен генерирует свой запрос – вектор, который «ищет» релевантные ключи для фокусировки внимания;
- b) K (Key) – матрица ключей $n \times d_k$. Ключи определяют, насколько сильно каждый токен влияет на другие. Чем выше сходство между Q_i (запросом для токена i) и K_j (запросом для токена j), тем больше внимания уделяется токenu j ;
- c) V (Value) – матрица значений размерности $n \times d_v$, где d_v – размерность вектора значения. Значения содержат информацию, которая будет агрегирована с учётом весов внимания;
- d) QK^T – Скалярное произведение, вычисляющее попарное сходство между всеми запросами и ключами. Результат вычисления матрица $n \times n$, где элемент (i, j) показывает, насколько токен i зависит от токена j ;
- e) $\sqrt{d_k}$ – масштабирующий коэффициент. Стабилизирует дисперсию скалярного произведения. Без него при больших d_k значения QK^T становятся слишком большими, что приводит к насыщению функции *softmax* и проблемам с градиентами;
- f) *softmax* – функция преобразования «сырых» весов сходства в вероятностное распределение, чтобы сумма весов для каждого токена равнялась 1.

Все три матрицы: Q , K и V получаются из исходных эмбеддингов токенов через линейные преобразования (2):

$$Q = X \cdot W_Q, K = X \cdot W_K, V = X \cdot W_V, \quad (2)$$

где X – матрица входных эмбеддингов токенов $n \times d_{\text{model}}$, W_Q , W_K , W_V – обучаемые весовые матрицы.

Таким образом, механизм внимания не требует ручной настройки, он автоматически обучается выделять значимые зависимости в последовательностях произвольной длины.

2.1.2. Multi-Head Attention как механизм внимания архитектуры GPT-4

В источнике [6], подтверждается, что в отличие от стандартной архитектуры трансформера, в *GPT-3* используется расширение базового механизма внимания, под названием *Multi-Head Attention*. Так как официально компания *OpenAI* не публиковывала деталей архитектуры *GPT-4*, можно предположить, что данная модель унаследовала данное расширение механизма. Согласно [3], *Multi-Head Attention* позволяет модели совместно обрабатывать информацию из разных подпространств представлений, что критически важно

для разнородных зависимостей в данных. Формально описанный механизм можно определить, как (3):

$$\text{MultiHead}(Q, K, V) = \text{Concat}(\text{head}_1, \dots, \text{head}_h) W^o, \quad (3)$$

где:

$$\text{head}_i = \text{Attention}(Q \cdot W_Q^i, K \cdot W_K^i, V \cdot W_V^i), \quad (4)$$

Q, K, V – исходные матрицы запросов, ключей и значений (размерность: $n \times d_{\text{model}}$, где n – число токенов, d_{model} – размерность эмбеддингов); W_Q^i, W_K^i, W_V^i – Весовые матрицы, которые преобразуют Q, K, V в подпространства для каждого head_i ($W_Q^i \in R^{d_{\text{model}} \times d_k}$ – проекция запросов для i -й head , $W_K^i \in R^{d_{\text{model}} \times d_k}$ – проекция ключей, $W_V^i \in R^{d_{\text{model}} \times d_v}$ – проекция значений); Concat – операция объединения выходов всех «голов» в одну матрицу для возможности использовать разнородные признаки; W^o – выходная сохраняющая согласованность размерностей в архитектуре трансформера ($W^o \in R^{(h \times d_v) \times d_{\text{model}}}$ преобразует конкатенированный результат обратно в исходную размерность d_{model}).

На основании представленного расширения механизма внимания, авторами выдвинута гипотеза, что в контексте этапов реконструкции модели процесса из пользовательских сценариев механизм *Multi-Head Attention* (предположительно используемый) в *GPT-4* может улучшить результат за счет параллельного анализа разноуровневых зависимостей (каждый набор «голов» фокусируются на разного рода задачах, одни отвечают за выявление порядка этапов процесса, другие за определение ролей акторов, а третьи за логические ветвления и т. д.) и адаптации к вариативности формулировок (*Multi-Head Attention* агрегирует признаки из разных подпространств, чтобы сопоставить синонимичные действия). Наиболее значительным преимуществом механизма *Multi-Head Attention* является его способность к обучению, что позволяет *GPT-4* адаптироваться к специфике бизнес-процессов без ручной настройки правил.

2.2. Процесс обучения модели ChatGPT-4

Обучение модели – это трудозатратный процесс, в котором алгоритм настраивает свои параметры на основе данных, чтобы эффективно решать задачи. Для этого используются математические методы, которые позволяют модели минимизировать ошибки и улучшать её производительность.

Процесс обучения *ChatGPT-4* основан на трёх ключевых этапах:

- предобучение (*pre-training*);
- дообучение с подкреплением на основе человеческой обратной связи (*Reinforcement Learning from Human Feedback, RLHF*);
- тестирование/оптимизация для развёртывания.

Этот подход унаследован из более ранних моделей *GPT-3* [6] и модифицирован с учётом новых задач, таких как безопасность и согласованность ответов [7].

1) *Предобучение (Pre-training)*. На этапе предобучения модель обучается на разнородных текстовых данных, включая книги, научные статьи, веб-страницы, форумы и код. Цель — сформировать общие языковые навыки: понимание синтаксиса, семантики и контекстных связей. Обучение проводится методом маскированного языкового моделирования (*masked language modeling*), где модель предсказывает пропущенные токены в последовательности, максимизируя вероятность правильного восстановления текста [8].

На данном этапе уже вытекают сложности в инфраструктуре, поскольку обучение требует масштабирования на кластерах из тысяч *GPU/TPU*, оптимизированных для

распределённых вычислений [9] и при этом используются техники параллелизма данных (*data parallelism*) и модельного параллелизма (*model parallelism*) для обработки моделей с сотнями миллиардов параметров [5].

2) *Обучение с подкреплением и человеческой обратной связью (RLHF)*. После предобучения модель дообучается с подкреплением для согласования ответов с ожиданиями пользователей. Данный процесс включает такие этапы, как:

- сбор данных обратной связи (модель генерирует несколько ответов на один запрос, которые оцениваются ассессорами (людьми) по шкале качества);
- обучение *reward*-модели (на основе оценок ассессоров строится функция вознаграждения (*reward model*), предсказывающая качество ответа)
- оптимизация политики (модель дообучается алгоритмом *Proximal Policy Optimization (PPO)* [10], чтобы максимизировать ожидаемое вознаграждение, минимизируя отклонение от исходной политики (предобученной модели)).

3) *Тестирование и развёртывание*. Перед внедрением модель проходит этап краудсорсинговой оценки (*red teaming*), где независимые эксперты выявляют риски генерации вредоносного или предвзятого контента [12]. Для оптимизации взаимодействия с пользователями модель адаптируется под работу через *API*, включая ограничение длины ответов и фильтрацию нежелательных тем [13].

Следовательно, после каждого этапа, в результате получался частично функционирующий продукт:

- после предобучения – модель, способная генерировать связный текст, но без тонкой настройки на этичность или безопасность;
- дообучения – модель, избегающая токсичных или вредоносных ответов, но сохраняющая креативность и тестирование;
- оптимизация для развёртывания – безопасная и стабильная модель, готовая для промышленного использования.

2.3. Обоснование использования готовой модели *ChatGPT-4* и ее возможности

В приведенных этапах обучения модели *ChatGPT-4* уже содержится часть обоснования использования готовой модели вместо создания собственного прототипа, однако необходимо выделить конкретные сложности:

- *вычислительная сложность обучения*. По оценкам, стоимость обучения *GPT-3* (предшественника *GPT-4*) составила ~\$4.6 млн, а для *GPT-4*, с учётом масштабирования, эта сумма достигает десятков миллионов долларов [5]. При этом, обучение производилось на эксклюзивных кластерах *GPU/TPU* (около 10,000 *NVIDIA A100* для *GPT-3*). Даже при наличии доступа у авторов к 100 *GPU* (графических процессоров), обучение модели уровня *GPT-4* заняло бы целые годы;
- *эффективность RLHF*. Алгоритмы обучения с подкреплением (*PPO*) и сбор человеческой обратной связи требуют координации тысяч ассессоров и месяцев работы [7]. Попытка воспроизвести этап *RLHF* малой экспертной группой может привести к перекосу в данных и неконтролируемому ухудшению качества;
- *доступность через API*. *OpenAI* предоставляет доступ к *ChatGPT-4* через *API*, позволяя интегрировать модель без затрат на обслуживание инфраструктуры [12], в число которых входят как траты на аренду серверов (стоимость *GPU/TPU*: от \$5,000/мес за узел), так и на оптимизацию инференса (квантование, дистилляция). Для развёртывания собственной требуется как минимум несколько инженеров (*MLOps, DevOps*), тогда как *API* позволяет начать работу за несколько часов.

- специализация на широком спектре задач. Готовая модель уже оптимизирована для генерации (создание текстов, кодогенерация, диалоги), классификации (анализ тональности, категоризация запросов) и извлечения информации (поиск сущностей, реконструкция процессов) широкого спектра задач (генерация, классификация, анализ), что позволяет сосредоточиться на прикладных исследованиях, а не на базовой настройке [5].

Следовательно, создание языковой модели уровня *GPT-4* связано с непреодолимыми для авторов исследования вызовами, включая экстремальные вычислительные затраты, необходимость координации масштабных человеческих ресурсов и сложность реализации алгоритмических компонентов. Применение готовой является наиболее экономически эффективным решением, позволяющим преодолеть указанные трудности.

3. Исследование качества реконструкции модели процесса с помощью модели *ChatGPT-4*

Целью исследования является оценка качества реконструкции бизнес-процессов с помощью языковой модели *ChatGPT*.

Эксперимент был разделён на 4 этапа:

- 1) Получение результатов обработки пользовательских сценариев языковой моделью *ChatGPT*.
- 2) Экспериментальная оценка качества реконструкции.
- 3) Расчет статистических показателей.
- 4) Сравнительный анализ качества реконструкции бизнес-процессов с подходом, использованным в источнике [2].

Получение результатов обработки пользовательских сценариев языковой моделью ChatGPT. В соответствии с приведенной во «Введении» методикой моделирования процессов языковой модели *ChatGpt 4* была поставлена задача по реконструкции элементов бизнес-процессов, выделенных в этапах 2-5. Считая границы процесса заданными, через *API* нейросетевой модели было отправлено 54 запроса, каждый из которых содержал задачу по выделению действий; И/ИЛИ шлюзов; субъектов и объектов; пулов и дорожек. В экспериментальном исследовании использовалась выборка из 54 коротких (до 300 слов) текстовых сценариев.

Экспериментальная оценка качества реконструкции. На этапе оценки качества реконструкции авторами был осуществлен анализ качества реконструкции бизнес-процессов с помощью модели *ChatGPT*. Оценка обработки нейросетевой моделью набора из 54-х пользовательских сценариев производилась на основании следующих критериев, представленных в табл. 1:

Таблица 1 – Критерии оценки

Критерий	Характеристика	Шкала
Оценка определения действий	число корректно распознанных элементарных операций в виде действий	Процентная шкала от 0 до 100 %
Оценка определения ресурсов	число корректно распознанных экземпляров пулов и дорожек	Процентная шкала от 0 до 100 %
Оценка определения объектов	число корректно распознанных экземпляров субъектов и объектов	Процентная шкала от 0 до 100 %
Оценка определения шлюзов	число корректно распознанных экземпляров И/ИЛИ шлюзов	Процентная шкала от 0 до 100 %

Критерии оценивались независимо друг от друга, во внимание принималось общее количество оцениваемых элементов в критерии и на основании допущенных ошибок в распознавании выносилась оценка качества обработки единичного пользовательского сценария.

Расчет статистических показателей. По полученным данным оценок, в каждом критерии были выделены минимальное и максимальное значение, получены такие величины как размах выборки, количество и длина интервалов. На основании середин интервалов и абсолютных частот (количества значений, попавших в определенный интервал) были построены полигоны абсолютных частот. Ключевыми рассчитанными статистическими оценками стали: дисперсия, среднеквадратичное отклонение, среднее арифметическое, мода и медиана. Все расчеты были производились полуавтоматически, с помощью средств, предоставляемых пакетом *Excel*.

Сравнительный анализ качества реконструкции бизнес-процессов с подходом на основании метода обработки естественного языка. На финальном этапе эксперимента была произведена сравнительная оценка обработанных статистических данных на основании применения модели *ChatGPT 4* и результатами применения подхода на основе правил грамматики зависимостей из источника [2].

4. Результаты эксперимента

В начале этапа статистической обработки в каждом из четырех наборов из 54 значений оценок были определены: максимальное и минимальное значение (*max* и *min*), размах выборки (*R*), количество и размер интервалов (*k* и *h*). Полученные значения величин были сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения для построения интервалов

	Оценка действий	Оценка ресурсов	Оценка объектов	Оценка шлюзов
<i>max</i>	100	100	100	100
<i>min</i>	70	70	70	65
<i>R</i>	30	30	30	35
<i>k</i>	6	6	6	6
<i>h</i>	5	5	5	5,83

Из приведенных данных в табл. 2, уже на начальном этапе эксперимента можно сделать промежуточный вывод о том, что *ChatGPT* продемонстрировал уверенные навыки обработки пользовательских сценариев, о чем говорит минимальное значение оценки, полученное по критерию обработки шлюзов в виде 65 %, а максимальное в критерии в 100 % по всем критериям.

На следующей итерации эксперимента на основании полученных значений (*k* и *h*) для каждого критерия были построены интервальные ряды, для которых были определены абсолютные частоты m_i (количество значений, попавших в определенный интервал) и *h* точки (середины интервалов). Пример полученных значений представлен в табл. 3.

Наблюдаемые данные из примера в табл. 3, в частности $m_i = 16$ для интервала (85,90] и $m_i = 15$ для интервала (95,100], полученные на этапе построения интервальных рядов свидетельствуют о том, что 31 экземпляр пользовательских сценариев (около 57 % от общего числа), получил оценку не менее 85 %, более того, только 3 значения попали в интервал [70,75], что уже свидетельствует о высокой эффективности в части выявления действий.

Далее, по полученным абсолютным частотам m_i (ось *Y*) и *h* точкам (ось *X*) были построены полигоны абсолютных частот (способ графического представления плотности вероятности). Полигоны частот были построены на едином графике для всех 4-х критериев и представлены на рис. 2.

Таблица 3 – Пример интервального ряда для значений критерия оценки действий

Интервальный ряд критерий оценки действий	m_i	h
[70,75]	3	72,5
(75,80]	10	77,5
(80,85]	6	82,5
(85,90]	16	87,5
(90,95]	4	92,5
(95,100]	15	97,5

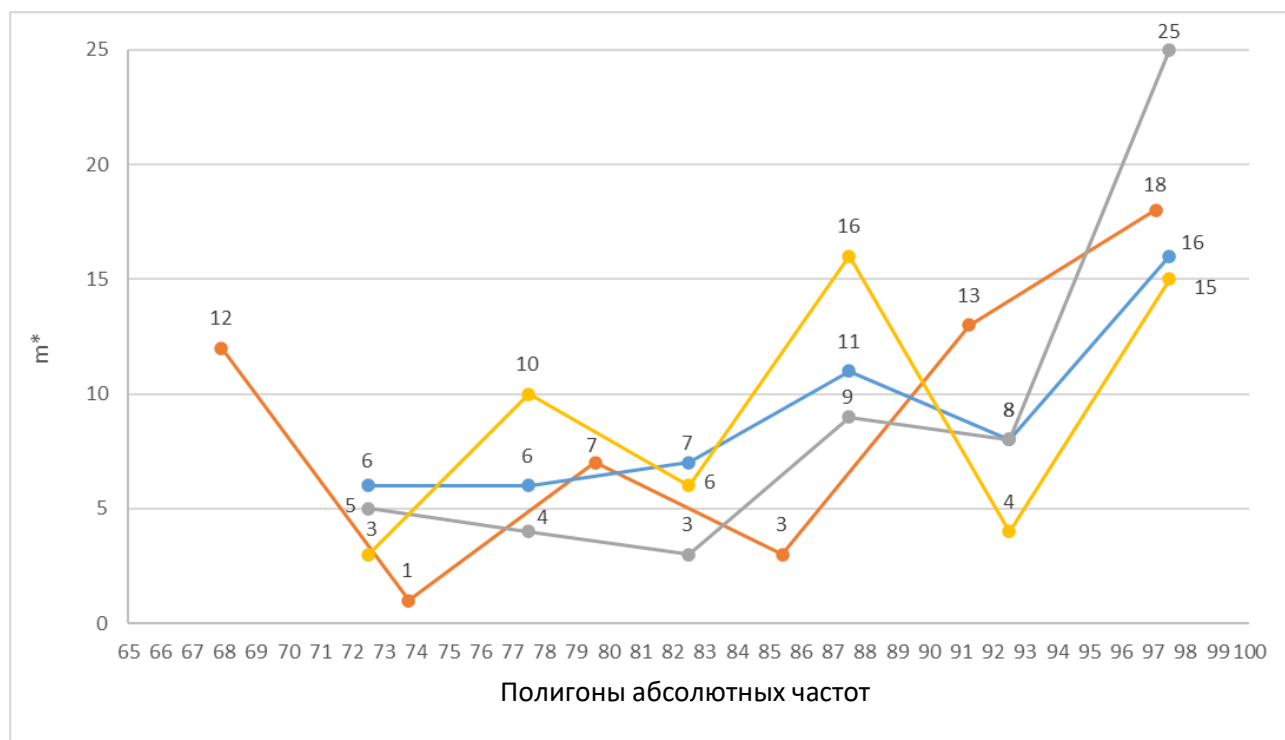


Рис. 2. Полигоны частот по 4-м критериям

Из рис. 2 следует, что наибольшее количество высоких оценок пришлось на критерий определения ресурсов и составило 25 оценок, попавших на середину интервала (95,100], т. е. 97,5 %, больше всего низких оценок пришлось на критерий определения шлюзов, 12 штук, попавших на середину интервала [65,70,8], т. е. 67,9 %, что все равно является довольно высоким показателем, принимая во внимание остальные полученные оценки в данном критерии.

На конечном этапе статистической обработки данных для каждого критерия были определены следующие значения: μ (среднее арифметическое); D (дисперсия); σ (среднеквадратичное отклонение); M_e (медиана) и M_o (мода).

Таблица 4 – Статистические оценки

	Оценка действий	Оценка ресурсов	Оценка объектов	Оценка шлюзов
μ	89,7	92,6	90,1	86,4
D	71,1	87,5	80,1	148,5
σ	8,4	9,4	9	12,1
M_e	90	95	90	90
M_o	90	100	100	100

Из значений величин табл. 4, следует, что рассмотренный в работе подход, несмотря на высокие показатели дисперсии и среднеквадратичного отклонения относительно всех критериев обладает высоким потенциалом для практического использования в части выявления ресурсов ($\mu = 92,6 \%$), объектов ($\mu = 90,1 \%$) и действий ($\mu = 89,7 \%$). Процент выделения шлюзов тоже является достаточно высоким ($\mu = 86,4 \%$), однако разброс значений оценок весьма значительный, что отражает величина дисперсии $D = 148,5$. Самым высоким показателем M_e (медианного) значения является $M_e = 95$, а $M_o = 100$ (значение, которое чаще всего встречалось в наборе оценок), обе эти величины приходятся на критерий определения ресурсов, который в итоге является наилучшим и отвечает за выявление пулов и дорожек. Ошибки модели *ChatGPT* в направлении выявления шлюзов объясняются недостаточной натренированностью в части определения И/ИЛИ шлюзов (чаще всего механизмы модели придумывали шлюзы, которых не было в пользовательских сценариях).

Полученные значения среднего арифметического по каждому критерию были опубликованы в сравнительную табл. 5 и сопоставлены с данными, полученными в результате применения подхода на основе правил грамматики зависимостей [1].

Таблица 5 – Сравнительные характеристики подходов

	Оценка действий	Оценка ресурсов	Оценка объектов	Оценка шлюзов
Подход на основе модели ChatGPT	89,7	92,6	90,1	86,4
Подход на основе правил грамматики зависимостей [2]	89	90	78	50

Значения среднего арифметического для подхода на основе правил грамматики зависимостей [2] были рассчитаны самостоятельно в связи с отсутствием таковых данных в работе. Исходя из полученных значений в таблице, следует, что результат применения подхода на основе языковой модели *ChatGPT* оказался значительно лучше в части выявления шлюзов (на 36,4 %) и объектов (на 12,1 %). Следует принять во внимание, что в данной работе оценка производилась на основании выборки из 54 пользовательских сценариев, а авторы работы [2] использовали только 5 тестовых примеров, в связи с чем, принимать во внимание разницу между значениями среднего арифметического определения действий и ресурсов нецелесообразно. Большая разница между значениями в части определения шлюзов объясняется предрасположенностью *ChatGPT* к выявлению И шлюзов, поскольку модель использует более сложные алгоритмы и обучалась на объемном наборе тестовых данных.

5. Выводы. Обсуждения

Полученные статистические оценки среднего в рамках эксперимента (параграф 3) на этапе обработки данных оценок на основании применения языковой модели *ChatGPT* отражают высокий потенциал модели в ее применении для автоматизации всех этапов реконструкции бизнес-процесса (действий, ресурсов, объектов и шлюзов). В отличие метода [2] подход обработки естественного на основе модели *ChatGPT* продемонстрировал значительные преимущества в части выделения шлюзов (на 36,4 %) и объектов (на 12,1 %). Эффективность выявленных показателей авторы объясняют использованием продвинутого механизма внимания *Multi-Head Attention*, позволяющего параллельно проводить анализ каждого из этапов реконструкции процесса. Кроме того, окончательный результат использования модели в дальнейших исследованиях может быть значительно улучшен, за

счет способностей нейросетевых моделей к дальнейшему обучению, что позволит *GPT-4* лучше адаптироваться к специфике бизнес-процессов.

Дальнейшие исследования авторы связывают с расширением выборки пользовательских сценариев для получения более значимых статистических оценок в части выявления ИИ/ИИИ шлюзов. Таким образом, планируется детально исследовать качество определения шлюзов, а также более точно охватить каждый этап реконструкции бизнес-процессов.

Литература

1. Ван дер Аальст В., Ван Хи К. Управление рабочими процессами: модели, методы и системы / пер. с англ. В. А. Башкин, И. А. Ломазова; под ред. И. А. Ломазовой. – М.: Логос, 2007. – 526 с.
2. Буравлев А. С., Демидова Д. Е., Васильев Н. В. Подход к выявлению элементов моделей бизнес-процессов из текстов на естественном языке // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 88-98. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-88-98.
3. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998–6008.
4. Документация ChatGPT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://openai.com/index/chatgpt/> (дата обращения: 19.03.2025).
5. OpenAI. GPT-4 technical report [Электронный ресурс]. — 2023. — Режим доступа: <https://cdn.openai.com/papers/gpt-4.pdf> (дата обращения: 10.01.2025).
6. Brown T., Mann B., Ryder N., et al. Language models are few-shot learners // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 1877–1901.
7. Ouyang L., Wu J., Jiang X., et al. Training language models to follow instructions with human feedback. – arXiv preprint arXiv:2203.02155. – 2022. – 54 p.
8. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. – arXiv preprint arXiv:1810.04805. – 2018. – 14 p.
9. Narayanan D., Shoeybi M., Casper J., et al. Efficient large-scale language model training on GPU clusters. – arXiv preprint arXiv:2104.04473. – 2021. – 12 p.
10. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., et al. Proximal policy optimization algorithms. – arXiv preprint arXiv:1707.06347. – 2017. – 12 p.
11. Ganguli D., Stepleton T., Leike J., et al. Red teaming language models to reduce harms. – arXiv preprint arXiv:2209.07858. – 2022. – 23 p.
12. OpenAI. ChatGPT API documentation [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://platform.openai.com/docs/api-reference/introduction> (дата обращения: 10.01.2025).
13. Bommasani R., Zoph B., Ford T., et al. On the opportunities and risks of foundation models. – arXiv preprint arXiv:2108.07258. – 2021. – 118 p.

References

1. Van der Aalst V., Van Hee K. Workflow management: models, methods and systems / translated from English by V. A. Bashkin, I. A. Lomazova; ed. by I. A. Lomazova. A. Lomazova. Moscow. Logos publ., 2007. 526 p. (In Russian).
2. Buravlev A. S., Demidova D. E., Vasiliev N. V. Approach to revealing elements of business process models from natural language texts. Means of Communication Equipment. 2024. № 3 (167). С. 88-98. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-88-98. (In Russian).
3. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. Attention is all you need. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 5998-6008.
4. ChatGPT documentation [Electronic resource]. Access mode: <https://openai.com/index/chatgpt/> (access date: 19.03.2025). (In Russian).
5. OpenAI. GPT-4 technical report [Electronic resource]. 2023. Access mode: <https://cdn.openai.com/papers/gpt-4.pdf> (access date: 10.01.2025).
6. Brown T., Mann B., Ryder N., et al. Language models are few-shot learners. Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 1877-1901.

7. Ouyang L., Wu J., Jiang X., et al. Training language models to follow instructions with human feedback. arXiv preprint arXiv:2203.02155. 2022. 54 p.
8. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805. 2018. 14 p.
9. Narayanan D., Shoenberger M., Casper J., et al. Efficient large-scale training of language models on GPU clusters. arXiv preprint arXiv:2104.04473. 2021. 12 p.
10. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., et al. Proximal policy optimization algorithms. arXiv preprint arXiv:1707.06347. 2017. 12 p.
11. Ganguli D., Stepleton T., Leike J., et al. Red teaming language models to reduce harms. arXiv preprint arXiv:2209.07858. 2022. 23 p.
12. OpenAI. ChatGPT API documentation [Electronic resource]. 2023. Access mode: <https://platform.openai.com/docs/api-reference/introduction> (access date: 10.01.2025).
13. Bommasani R., Zoph B., Ford T., et al. On the opportunities and risks of foundation models. arXiv preprint arXiv:2108.07258. 2021. 118 p.

Статья поступила 11 февраля 2025 г.

Информация об авторах

Буравлев Андрей Сергеевич – студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: методы обработки естественного языка, анализ бизнес-процессов. E-mail: asburavlev@stud.etu.ru.

Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф.

Демидова Дарья Евгеньевна – студентка Национального исследовательского университета ИТМО. Область научных интересов: методы обработки естественного языка. E-mail: daryademidovaa@yandex.ru.

Адрес: 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Ткачева Екатерина Александровна – студентка Национального исследовательского университета ИТМО. Область научных интересов: методы обработки естественного языка, анализ бизнес-процессов. E-mail: katerina-2007-@mail.ru.

Адрес: 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Analysis of business process reconstruction quality using ChatGPT language model

A. S. Buravlev, D. E. Demidova, E. A. Tkacheva

Annotation. It is difficult to imagine software development without tools for automation of routine activities, not a small part of which falls on formalization of requirements using graphical modeling languages. Conversion of textual information into formalized processes takes a considerable amount of time of business analysts, most of which can be spent on other important tasks, including both coordination of problem statements with customers and developers. A solution to this problem may be the application of rapidly evolving language models designed for natural language processing. The purpose of this research is to analyze the possibilities of increasing the efficiency of labor activity of business analysts in terms of business process reconstruction using the ChatGPT 4.0 language model. Scientific novelty of the work consists in obtaining previously unknown results of ChatGPT efficiency for reconstruction of separate projections of business processes (control flow, data, resources, operations) on the basis of studying the results of reconstruction of 54 short user scenarios with further comparative analysis with the existing approach of reconstruction of processes on the basis of rules of grammar of dependencies. Practical significance of the research is conditioned by the obtained statistical evaluations and comparative characterization, on the basis of which the conclusion is made about the prospects of application of the investigated language model in real tasks of processes formalization. The following tasks are solved in the work: analysis of architecture and capabilities of ChatGPT 4.0 model in terms of natural language processing, development of methodology for assessing the quality of business process

reconstruction, experimental assessment of reconstruction quality, obtaining statistical evaluations, comparative analysis with the existing approach based on dependency grammar rules. To achieve the set tasks, the paper uses the apparatus of statistical data processing, expert analysis, applied linguistics and neural networks.

Keywords: *business process, natural language processing, gateways, neural networks, transformer model, language models, ChatGPT*

Information about the authors

Buravlev Andrey Sergeyevich is a student of V. I. Ulyanov (Lenin) St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”. Research interests: methods of natural language processing, analysis of business processes. E-mail: asburavlev@stud.etu.ru

Address: 197022, Russia, Saint- Petersburg, Professor Popov Street, 5, lit. F.

Demidova Daria Evgenievna - student of the National Research University ITMO. Research interests: methods of natural language processing. E-mail: daryademiddovaa@yandex.ru.

Address: 197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr. 49, lit. A.

Tkacheva Ekaterina Alexandrovna is a student of National Research University ITMO. Research interests: methods of natural language processing, business process analysis. E-mail: katerina-2007-@mail.ru.

Address: 197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr. 49, lit. A.

Для цитирования:

Буравлев А. С., Демидова Д. Е., Ткачева Е. А. Анализ качества реконструкции бизнес-процессов с помощью языковой модели ChatGPT // Техника средств связи. 2025. № 1 (169). С. 84-97. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-84-97

Buravlev A. S., Demidova D. E., Tkacheva E. A. Analysis of business process reconstruction quality using ChatGPT language model. Means of Communication Equipment. 2025. Nº. 1 (169). Pp. 84-97. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-1-84-97

Решением ВАК № 222-р от 10 июня 2024 года

научно-технический журнал «Means of Communication Equipment» («Техника средств связи») включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень*) и рекомендован Высшей аттестационной комиссией для публикаций основных результатов по научным специальностям**:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки);

2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии (технические науки);

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

** В Перечне по состоянию на 05 февраля 2025 г. № 91 (ISSN: 2782-2141).*

*** В соответствии с номенклатурой, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24 февраля 2021 г. N 118 и рекомендацией Президиума Высшей аттестационной комиссии N 15/1-нс от 28 мая 2021 г.*

Индексы ГРНТИ:

20.00.00 Информатика.

28.00.00 Кибернетика.

45.00.00 Электротехника.

47.00.00 Электроника. Радиотехника.

47.05.00 Теоретическая радиотехника.

47.41.00 Радиоэлектронные схемы.

47.51.39 Синтез и обработка телевизионных сигналов.

49.00.00 Связь.

49.03.05 Теория обработки сигналов в системах связи.

49.27.00 Система передачи.

49.31.00 Многоканальная связь.

49.39.00 Телефонная связь и аппаратура.

49.43.00 Радиосвязь и радиовещание.

50.00.00 Автоматика. Вычислительная техника.

49.33.35 Надежность сетей связи и защита информации.

50.37.23 Защита от несанкционированного доступа. Физическая защита информации.

50.41.27 Компьютерные вирусы. Антивирусные программы.

78.00.00 Военное дело

81.93.29 Информационная безопасность. Защита информации

В День Победы

Повезло нам, живые,
Видеть мирные сны,
Жить, под небом России
В тишине, без войны...
Благодарны мы дедам,
Старшим братьям, отцам
И пришедшим с Победой
И погибшим бойцам.

Мы склоняемся низко
У могилок святых
И кладём к обелискам
В День Победы цветы,
Здесь в молчаньи суровом
Клятву — верность даем,
Подвиг павших героев
Глубже осознаем.

Мир сквозь прорезь прицела
Был и узок, и сер...
Вы вернули всецело
Ему прежний размер
Вновь течет величаво
Жизнь в свободном краю,
Рядом с вашей славой
Мы сегодня в строй.

Не позволим же, дети
Тех, кто рано погиб,
Чтоб на нашей планете
Вырос атомный гриб.
Нам, Отчизна, доверься
Мы надёжный твой щит...
В каждом бьющемся сердце
Память — пламя горит.

Владимир Жуков

