

# ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ и СВЯЗЬ

№2 (05) 2025

## ТЕМА НОМЕРА:

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ЛОЖНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ  
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ ОПЕРАЦИЯХ

[WWW.TELEMIL.RU](http://WWW.TELEMIL.RU)

DOI: 10.21681/3034-4050



Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, Свидетельство о регистрации ПИ ПИ No ФС77-88069 от 16.08.2024

Журнал специализируется на публикации статей по специальностям перечня научных специальностей 6.0.0.

### Главный редактор

**ИВАНОВ Василий Геннадьевич**, д.в.н., доцент, Москва

### Председатель Редакционного совета

**РУБИС Александр Анатольевич**, к.т.н., Москва

### Шеф-редактор

**МАКАРЕНКО Григорий Иванович**, с.н.с., Москва

### Редакционный совет

**ПЫЛИНСКИЙ Максим Валерьевич**, д.в.н., профессор, Белоруссия

**РЫЖОВ Геннадий Борисович**, д.в.н., профессор, Москва

**СТАРДУБЦЕВ Юрий Иванович**, д.в.н., профессор, Санкт-Петербург

**ХАРЧЕНКО Евгений Борисович**, к.соц.н., доцент, Москва

### Редакционная коллегия

**БУЙНЕВИЧ Михаил Викторович**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург

**ГЛУШАНКОВ Евгений Иванович**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург

**ИВАНОВ Сергей Александрович**, д.т.н., Санкт-Петербург

**КОЗАЧОК Александр Васильевич**, д.т.н., доцент, Орел

**КОРОБКА Сергей Владимирович**, д. в.н., Москва

**КОСТОГРЫЗОВ Андрей Ивнаович**, д.т.н., профессор, Москва

**МАКАРЕНКО Сергей Иванович**, д.т.н., доцент, Санкт-Петербург

**МАРКОВ Алексей Сергеевич**, д.т.н., доцент, Москва

**РЫЖКОВ Анатолий Васильевич**, д.т.н., профессор, Москва

**САВИЩЕНКО Николай Васильевич**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург

**СИВАКОВ Игорь Романович**, д.в.н., Москва

**ЦИМБАЛ Владимир Анатольевич**, д.т.н., профессор, Серпухов

**ФИНЬКО Олег Анатольевич**, д.т.н., профессор, Краснодар

### Учредитель и издатель

ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт Министерства Обороны РФ»  
(Военно-научный комитет Главного управления связи Вооружённых Сил Российской Федерации)

### Над номером работали:

Г. И. Макаренко – шеф-редактор, Н. В. Селезнев – отв. секретарь,  
В. А. Пестерева – верстка, А.М. Старков – маркетинг и подписка

Подписано к печати 30.04.2025 г.

Общий тираж 120 экз. Цена свободная

Адрес: 141006, г. Мытищи Московской обл.,

1-й Рупасовский пер., д. 1.

E-mail: editor.tis@yandex.ru тел.: +7 (995) 153-43-88

Требования, предъявляемые к рукописям,  
размещены на сайте: <https://telemil.ru/>

# СОДЕРЖАНИЕ

## ВОЕННЫЕ СВЯЗИСТЫ, РАБОТНИКИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ!

С.А. Анищенко, В.С. Сафанюк.....2

## ВОЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

### ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ЛОЖНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Чуднов А. М., Курашев З.В.....4

### ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИГНАЛОВ С ПРОГРАММНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ И ЧАСТОТНО-ИНТЕРВАЛЬНЫМ КОДИРОВАНИЕМ

Ляценок С.А.....10

### ФИЗИКО-ПЛАНИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ

Усацкий В.А., Селезнев А.В., Волков В.А.....19

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

### МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Манилюк Е.П., Гречишников Е.В., Гречишникова Т.А.....25

## СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ СВЯЗИ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВ СВЯЗИ СУХОПУТНЫХ ВОЙСК США

Лукиянич В.Н., Сорокин К.Н.....31

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЯЗИ И АСУ

### ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ТЕХНИКИ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Вылков А.С., Шатков В.Ю.....40

## ВОЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ

### ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОТОКОЛА МОНИТОРИНГА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ УЗЛА СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Боговик А.В., Сафиулов Д.М.....53

### ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ СВЯЗНОСТИ СЕТЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Якушенко С.А., Шевяков В.Д., Садовников В.Е., Гладких Д.С.....65

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫМ СПЕКТРОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Мешалкин В.А., Лукьянич В.Н., Коньков Д.И., Поляков Д.Н.....74



*С.А. Анищенко  
Исполнительный директор  
АО «НПО Ангстрем»*



*В.С. Сафанюк  
Генеральный конструктор  
АО «НПО Ангстрем»*

### **ВОЕННЫЕ СВЯЗИСТЫ, РАБОТНИКИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ!**

В современных условиях успех ведения боевых действий в большей степени зависит от качества управления, которое во многом определяется состоянием системы военной связи. Решающее влияние на состояние военной связи оказывают научно-производственные возможности государства в обеспечении войск средствами связи в необходимом количестве. Успешное функционирование военной связи зависит от соответствия средств связи предъявляемым требованиям, уровня подготовки эксплуатирующего персонала, методического обеспечения процессов обучения персонала и боевого применения средств связи. ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России принимает самое непосредственное участие в обосновании требований к системе и средствам связи, сопровождении НИОКР по их реализации и проведении испытаний, сопровождении производства средств связи, разработке принципов боевого использования, методических и нормативных материалов. Трудно переоценить роль «16 ЦНИИИ» Минобороны России в организации взаимодействия предприятий промышленности при выполнении Государственного оборонного заказа, обобщении и обмене опытом боевого использования средств связи, формировании требований к перспективным средствам связи, координации научных оборонных исследований.

Примером такого взаимодействия является многолетнее творческое сотрудничество Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Ангстрем» (АО «НПО Ангстрем») и ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России, которое привело к внедрению в систему военной радиосвязи передовых научных и новых технологических решений, реализующих концепцию программно-конфигурируемого радио.

АО «НПО Ангстрем» совместно с ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России за послед-

ние 10 лет разработали, испытали и апробировали, в том числе в зоне проведения Специальной военной операции, комплекс программно-конфигурируемых средств радиосвязи 6-го поколения «Азарт», в которых посредством программного обновления обеспечивается расширение их функциональности. Для осуществления этого процесса АО «НПО Ангстрем» разработана технология программного обновления радиостанций в полевых условиях. В частности, в радиостанциях за период производства и войсковой эксплуатации реализовано несколько технологий связи, обеспечивающих ведение радиообмена в цифровой и аналоговой форме с подобными радиостанциями и радиостанциями унаследованного парка.

В настоящее время в комплекс входят:

- портативная радиостанция;
- портативная радиостанция «солдатская»;
- портативная радиостанция «командирская»;
- унифицированный приемо-передатчик;
- устройство сбора десанта;
- носимая радиостанция;
- транспортная радиостанция;
- возимая радиостанция;
- линейная радиостанция;
- стационарная радиостанция;
- авиационная радиостанция.



*Портативная радиостанция «солдатская»*

В радиостанциях реализованы режимы криптографической защиты передаваемой информации, а также протоколы помехозащищенной радиосвязи с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты со скоростью до 20000 скачков в секунду. Кроме того, в радиостанциях реализованы функции многоканальной и многоинтервальной ретрансляции с частотно-временным разделением доступа.

В состав комплекса входит различное периферийное оборудование (гарнитуры, аккумуляторы, усилители, микрофоны, антенно-фидерные устройства и т.д.) и аппаратура внутренней связи, коммутации и управления.

В дальнейшем АО «НПО Ангстрем» планирует решение системных задач по построению единого информационного пространства на основе перспективных помехо- и разведзащищенных протоколов радиосвязи, обеспечивающих сетевое управление. Такие решения могут быть построены на средствах комплекса радиосвязи 6-го поколения «Азарт» посредством их программной модернизации (обновление программного обеспечения). Кроме того, АО «НПО Ангстрем» осуществляется модернизация аппаратной платформы радиостанций, которая в максимальной степени ориентирована на отечественную компонентную базу, программную реализацию разработанных ранее протоколов радиосвязи и дополнительно обеспечивает:

- большой ресурс программного обновления;
- реализацию новых протоколов высокоскоростного информационного обмена;
- существенное улучшение частотных и энергетических характеристик радиотрактов;
- расширение возможностей интерфейса радиостанций при подключении внешних устройств;
- расширение возможностей интерфейса оператора за счет реализации возможности измерения параметров физической активности и режимов пассивной навигации.



*Линейная радиостанция*

С целью наиболее полного учета опыта боевого использования средств радиосвязи 6-го поколения АО «НПО Ангстрем» при сопровождении ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России и Военного представительства Минобороны России проводит инициативно новые разработки. В частности, в последние годы АО «НПО Ангстрем» проводит интеграцию комплекса средств радиосвязи 6-го поколения «Азарт» в бронетанковое вооружение и технику, беспилотные системы и, прежде всего, в беспилотные летательные аппараты. Комплекс мероприятий включает в себя:

- первоначальную апробацию — натурная стыковка средств связи в подвижных объектах;
- моделирование и проектирование — теоретическая оценка удобства пользования и эффективности применения;
- изготовление доработанных образцов и периферийного оборудования (кабели, переходники и т. д.);

- проведение тестовых испытаний — предварительные испытания;
- проведение типовых испытаний в составе подвижных объектов — под контролем Военного представительства Минобороны России
- войсковая апробация в условиях, приближенных к боевым;
- доработка и запуск в серийное изготовление.



*Линейная радиостанция*

После поставки оборудования в войска, АО «НПО Ангстрем» совместно с ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России осуществляет подконтрольную эксплуатацию, в процессе которой накапливаются замечания и рекомендации обслуживающего персонала по введенным обновлениям. В результате подконтрольной эксплуатации формируются задачи по разработке новой версии программного обеспечения радиостанций. Эта процедура повторяется многократно, что позволяет значительно до 15-18 лет продлевать срок службы радиостанций. Обновление программного обеспечения продлевает период морального старения радиосредств, что является одной из особенностей комплекса средств радиосвязи 6-го поколения «Азарт».

Многолетний опыт и результаты творческого сотрудничества АО «НПО Ангстрем» и ФГБУ «16 ЦНИИИ» подчеркивают необходимость расширения и углубления такого сотрудничества в рамках отрасли развития системы военной связи.

Мы верим, что ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России и редакция научного журнала «Телекоммуникация и связь» смогут создать авторитетную профессиональную среду, в которой получат развитие самые передовые научные идеи и найдут решение наиболее актуальные практические задачи в области систем военной связи.

Желаем редакции журнала творческих успехов, целенаправленной работы по продвижению в науку, производство, в войсковую практику лучших достижений телекоммуникационных технологий, интересных авторов и благодарных читателей.

**Исполнительный директор АО «НПО Ангстрем»  
С.А. Анищенко**

**Генеральный конструктор АО «НПО Ангстрем»  
В.С. Сафанюк**

# ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ЛОЖНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Чуднов А. М.<sup>1</sup>, Курашев З. В.<sup>2</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-4-9

**Ключевые слова:** разведзащищенность, радиоизлучающие средства, ложные источники радиоизлучения, псевдоабоненты.

**Цель работы** заключается в разработке предложений, способствующих эффективному применению ложных источников радиоизлучений в процессе функционирования беспроводной сети передачи данных.

**Метод исследования:** Аналитический с использованием элементов теории множеств.

**Результаты исследования:** Рассмотренные в работе принципы и варианты использования ложных источников радиоизлучения, а также приведенные примеры их взаимодействия с объектами беспроводной сети передачи данных с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты свидетельствуют о возможности эффективного использования подсистемы ложных источников радиоизлучения в системе связи.

**Научная новизна** заключается в разработке способа адаптивной перестройки алгоритма псевдослучайной перестройки рабочей частоты позволяющей получить дополнительный выигрыш в эффективности функционирования радиолинии, который в зависимости от состояния случайных (взаимных) помех в выделенном диапазоне частот может составлять значительную величину.

## Введение

К связи обычно предъявляются требования по обеспечению безопасности, достоверности и своевременности обмена сообщениями пользователей системы. В роли пользователей систем ведомственной связи, как правило, выступают объекты системы управления как надсистемы системы связи. В системах ведомственной связи в силу ряда незаменимых достоинств широкое применение могут находить подсистемы беспроводной связи, наличие радиоизлучающих средств которых обеспечивает разведдоступность объектов, как самой системы связи, так и системы более высокого уровня иерархии для внешних систем. В ряде случаев разведдоступность источников электромагнитного излучения системы связи, с одной стороны, накладывает существенные ограничения на варианты и режимы их использования и, с другой, приводит к дополнительным рискам и потерям в процессе функционирования системы управления, которые связаны с нежелательными воздействиями внешних систем, интегрируемых в понятие противоборствующей стороны.

Разведзащищенность системы связи характеризует ее способность противостоять всем

видам разведки внешних систем. Из всех видов разведки, направленной на вскрытие системы связи, наиболее эффективной является радио-разведка, позволяющая в реальном масштабе времени определять местоположение, принадлежность радиоизлучающих средств, структуру системы управления и связи.

На практике в целях обеспечения требований по разведзащищенности системы связи и системы управления обычно предусматривается выполнение комплекса мероприятий, направленных на уменьшение вероятности вскрытия радиоизлучающих средств системы связи [1, с. 225; 2, с. 35], а именно: ограничение использования средств радиолокации и радиосвязи, работу на пониженной мощности, ограничение секторов при работе радиоизлучающих средств, частичное сокрытие рабочего диапазона волн радиотехнических средств, смену рабочих волн и позывных, вхождение в связь без позывных, созданием ложных радиосетей и направлений, а также проведением других специальных мероприятий.

Однако, как показывает анализ состояния и перспектив развития возможных

<sup>1</sup>Чуднов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail: chudnow@yandex.ru

<sup>2</sup>Курашев Заур Валерьевич, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. E-mail: Frankilou@yandex.ru

средств радиоразведки, меры, связанные с регламентацией режима работы радиопередатчиков и, в частности, с ограничением числа и/или длительности сеансов связи, оказываются малоэффективными с позиции повышения разведзащищенности, и в то же время приводят к существенным потерям эффективности функционирования системы связи. С учетом этого, а также опыта эксплуатации систем связи в условиях конфликтов следует признать, что одно из важнейших мест в обеспечении разведзащищенности систем беспроводной связи может занимать создание ложных объектов систем связи и пунктов управления, включающих ложные источники радиоизлучений (ЛИР).

В научно-технической литературе изучению принципов использования ЛИР в системах связи и управления уделено недостаточно внимания. Так, отсутствуют методы разработки и анализа эффективности систем связи, взаимодействующих с системами (включающих) ЛИР, позволяющие принимать обоснованные решения по определению их числа, типов, режимов функционирования и др. В то же время о практической потребности изучения отмеченных вопросов свидетельствует наличие технических разработок, предназначенных для имитации работы радиопередающих средств системы связи.

В настоящей работе ложные источники радиоизлучений, имитирующие работу передатчиков радиопередающих средств системы связи, называются также псевдоабонентами. Рассматриваются общие принципы их использования, приводится обоснование возможных различных вариантов построения и режимов функционирования. В общих чертах рассматривается принцип анализа и оптимизации системы связи с псевдоабонентами. Представлен пример работы радиопередающих средств системы связи с псевдослучайной перестройкой рабочих частот, функционирующих в условиях случайных и преднамеренных помех при взаимодействии с включенными в систему псевдоабонентами.

### **Требования к ЛИР.**

#### **Виды и варианты их использования**

Ложные источники радиоизлучений должны удовлетворять следующим требованиям:

1. С высокой степенью достоверности имитировать работу, функционирующих в системе связи и управления источников радиоизлучений. Совокупность псевдоабонентов должна имитировать работу совокупности радиопередающих средств системы (подсистемы) связи.
2. Не должны нарушать работоспособность или снижать эффективность функционирования

системы связи; функционирование ЛИР должно быть согласовано по режимам работы и параметрам излучаемых сигналов с режимами работы и параметрами сигналов, используемых в системе связи, чтобы не создавать помех средствам, линиям и комплексам связи.

3. Быть просто реализуемыми, обеспечивать возможность простой установки в местах предполагаемого размещения, простого ввода в действие и эксплуатации. Технические средства ЛИР должны иметь стоимость неизмеримо меньшую стоимости имитируемых объектов.
4. Не должны содержать информации, доступ к которой может быть использован для нарушения нормальной работы системы связи или нанесения ущерба объектам системы связи и системы управления.

Псевдоабоненты могут реализовываться в различных вариантах, предусматривающих различные режимы использования. Основные варианты отражены следующей классификацией.

Псевдоабоненты могут реализовываться в различных вариантах, предусматривающих различные режимы использования. Основные варианты отражены следующей классификацией.

Ложные источники радиоизлучений можно подразделить:

- ✓ по выполняемым функциям: передающие и приемопередающие;
- ✓ по принципу управления: автономные и управляемые по сигналам управляющих объектов;
- ✓ по методам принятия решений: анализирующие и неанализирующие частотный диапазон;
- ✓ по рабочему диапазону частот: КВ, УКВ; частотным характеристикам излучаемых сигналов;
- ✓ по кратности использования: разового и многократного использования;
- ✓ по месту использования: наземные, надводные, воздушные и т. д.;
- ✓ по способам доставки к месту установки: устанавливаемые и забрасываемые.

Более детально псевдоабоненты могут характеризоваться при конкретизации типа и места использования системы передачи информации. Так, при работе совокупности радиопередающих средств системы связи в режиме синхронного псевдослучайного переключения рабочих частот ЛИР могут функционировать либо синхронно на свободных частотно-временных позициях, либо асинхронно, например, в отдельном диапазоне частот, не пригодном для передачи информации.

Система управления для управляемых ЛИР может строиться по общим принципам построения систем управления распределенными объектами. Пункты управления псевдоабонентами могут совмещаться с пунктами управления системы связи. При этом управление системой псевдоабонентов может осуществляться с позиций обеспечения минимального уровня помех системе связи.

### Общие принципы оценки эффективности использования ЛИР

Выработка обоснованных решений по вариантам использования псевдоабонентов в составе системы связи, структуре подсистемы ЛИР, способам их взаимодействия с управляемыми объектами, режимам работы и параметрам излучаемых сигналов возможна лишь на основе применения методов анализа и оптимизации с использованием моделей, учитывающих влияние ЛИР как показатели разведзащищенности маскируемых объектов системы управления и системы связи, так и на показатели эффективности системы связи. Далее рассматривается общий подход к построению такого типа моделей и постановке задачи анализа и оптимизации.

Пусть некоторая формализованная модель системы связи обеспечивает оценку ее показателя эффективности функционирования в виде функционала:  $Q_{CC}(S_{ПА}, A_{ПА}, V_{ПА})$ , где:  $S_{ПА}, A_{ПА}, V_{ПА}$  — соответственно структура, алгоритм и ресурс подсистемы псевдоабонентов. Аналогичны функционал  $Q_{ПУ}(S_{ПА}, A_{ПА}, V_{ПА})$ , может быть сформирован в рамках подходящей модели, учитывающей показатели разведзащищенности, и для объектов системы управления. Поскольку ЛИР имитируют средства радиоизлучений системы связи, то в практических ситуациях объекты модели  $S_{ПА}, A_{ПА}$  должны быть максимально согласованы с системой связи, при этом можно положить  $Q_{ПУ}(V_{ПА})$ . В таком случае при справедливости обобщенной оценки эффективности функционирования системы управления в виде  $Q_{СУ} = Q_{ПУ} Q_{CC}$  можно придти к оптимизационной задаче вида:

$$Q_{СУ}(S_{ПА}, A_{ПА}, V_{ПА}) = Q_{ПУ}(V_{ПА}) Q_{CC}(S_{ПА}, A_{ПА}, V_{ПА}) \rightarrow \max S_{ПА}, A_{ПА}, V_{ПА},$$

где оптимизация осуществляется во множестве допустимых (реализуемых) структур, алгоритмов и ресурса подсистемы псевдоабонентов.

Так, например, в частном случае, выделяя из общей задачи выбранный (обоснованный) вариант подсистемы с однотипными псевдоабонентами, можно получить оптимизационную задачу вида

$$Q_{ПУ}(V_{ПА}) Q_{CC}(V_{ПА}) \rightarrow \max V_{ПА},$$

направленную на отыскание оптимального ресурса подсистемы однотипных псевдоабонентов.

### Пример использования ЛИР в системе с ППРЧ

Для анализа возможностей использования псевдоабонентов в беспроводной сети передачи данных была проанализирована работа системы передачи информации с алгоритмом псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в условиях случайных и преднамеренных помех [5, с. 35; 7, с.2; 8, с 104].

Это обусловлено тем, что, во-первых, для обеспечения помехозащищенности таких систем широко используются алгоритмы ППРЧ, во-вторых, в таких системах могут быть включены ПА в качестве абонентов или с особым алгоритмом, а в-третьих, этот режим является наиболее общим для анализа, так как другие варианты использования анализа являются частными по отношению к нему.

Особенность данной системы состоит в том, что приемником радиoliniи анализируется помеховая ситуация в выделенном диапазоне частот, с учетом которой осуществляется адаптация параметров системы в процессе функционирования. Псевдоабоненты, включенные в состав такой системы связи, могут работать в режиме ППРЧ как синхронно на правах входящих в систему радиoliniи (РЛ), так и асинхронно в выделенном для этого диапазоне частот. В зависимости от варианта использования определяются структура подсистемы ЛИР, способ их взаимодействия с управляемыми объектами, а также функциональный тип псевдоабонентов.

На основе методов, разработанных в [1, с 225], а также в работах [3, с. 71; 4, с. 142] для анализа процессов включения-выключения в систему связи псевдоабонентов рассмотрен предложенный в [6, с.249; 9, с 898] адаптивно-игровой алгоритм ППРЧ, основанный на использовании рекуррентных процедур настройки вероятностных и энергетических параметров режима ППРЧ. В отличие от адаптивно-игрового подхода, требующего для осуществления каждой перестройки при изменении условий функционирования нахождение равновесных ситуаций, предложенный в [1, с. 38] алгоритм настраивается (перестраивается) в процессе функционирования. Определение параметров режима ППРЧ для совокупности радиoliniи осуществляется управляющим объектом с учетом состояния среды распространения сигналов и помех в выделенном диапазоне частот. Данные о новом режиме ППРЧ передаются от управляющего объекта всем РЛ и ЛИР и вводятся в действие синхронно в определенный момент времени.

В таблице представлены результаты анализа вероятности ошибки в системе в режимах перестройки а) включении преднамеренных помех; б) выключении преднамеренных помех при различных значениях числа выделенных частот  $n$  и средней (приходящейся на одну частоту) мощности оптимизированной пред-

намеренной помехи ( $\delta_{cp}$  — отношение помеха/сигнал в точке приема). Как видно, в рассмотренных случаях процедура обеспечивает быструю сходимость адаптивного алгоритма ППРЧ к оптимальному. При увеличении числа рабочих частот сходимость процедуры несколько ухудшается.

Таблица 1 — Вероятность ошибочного приема двоичного символа в процессе настройки радиолинии при включении (процесс «а») и выключении (процесс «б») источника помехи

$n, \delta_{cp}$	Процесс	№ шага							
		0	4	8	12	16	20	24	$\infty$
$\delta_{cp} = 0,01$ $n = 10$	a	1,9E-02	1,0E-02	6,7E-03	5,0E-03	4,2E-03	4,2E-03	4,2E-03	4,2E-03
	b	4,5E-04	2,0E-04	9,7E-05	6,5E-05	6,2E-05	6,2E-05	6,2E-05	6,2E-05
$\delta_{cp} = 0,01$ $n = 100$	a	1,7E-01	9,0E-02	4,9E-02	2,8E-02	1,9E-02	1,4E-02	1,2E-02	1,1E-02
	b	1,5E-04	1,2E-04	1,0E-04	8,5E-05	7,4E-05	6,7E-05	6,3E-05	6,2E-05
$\delta_{cp} = 0,04$ $n = 10$	a	7,5E-02	4,1E-02	2,7E-02	2,0E-02	1,7E-02	1,6E-02	1,6E-02	1,6E-02
	b	1,5E-03	7,7E-04	2,7E-04	1,6E-04	1,6E-04	1,6E-04	1,6E-04	1,6E-04
$\delta_{cp} = 0,04$ $n = 100$	a	3,1E-01	2,1E-01	1,4E-01	9,9E-02	7,3E-02	5,8E-02	5,0E-02	4,3E-02
	b	4,0E-04	3,2E-04	2,6E-04	2,2E-04	1,9E-04	1,7E-04	1,6E-04	1,6E-04

Предложенный способ адаптивной перестройки алгоритма ППРЧ позволяет получить дополнительный выигрыш в эффективности функционирования радиолинии, который в зависимости от состояния случайных (взаимных) помех в выделенном диапазоне частот может составлять значительную величину.

Следует отметить, что как при синхронной работе ЛИР в системе с ППРЧ, так и при асинхронной за счет использования соответствующих методов управления можно обеспечить эффективное функционирование системы связи с включенными псевдоабонентами. Общее число РЛ и ЛИР может быть доведено до числа выделенных независимых частот  $n$ , и при этом можно обеспечить такую же помехозащищенность РЛ, как и без включенных в систему ЛИР.

Итерационные процедуры поиска равновесных ситуаций, с одной стороны, обеспечивают возможность анализа эффективности подобных адаптивных алгоритмов и, с другой, могут непосредственно использоваться для управления режимами работы радиолинии в процессе ее функционирования. В последнем случае для

управления радиолинией в реальном времени при наличии большого числа выделенных частот, по-видимому, потребуются оптимизация процедуры поиска равновесных ситуаций подходящими методами оптимизации в рамках теории игр.

### Заключение

Применение ложных источников радиозлучений представляет собой один из важных способов радиомаскировки систем связи и пунктов управления и обеспечения требований, предъявляемых к ним по разведзащищенности. Эффективное использование ЛИР возможно на основе решения оптимизационных задач с использованием адекватных моделей, учитывающих различные аспекты функционирования подсистемы ЛИР в системе связи.

Рассмотренные в работе принципы и варианты использования ЛИР, а также приведенные примеры их взаимодействия с объектами беспроводной сети передачи данных с ППРЧ свидетельствуют о возможности эффективного использования подсистемы ЛИР в системе связи.

### Литература

1. Чуднов, А.М., Орлова А.А. Настройка алгоритма переключения рабочих частот радиолинии, функционирующей в условиях случайных и преднамеренных помех // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды IX Межвузовской научно-практической конференции: Сборник материалов, Санкт-Петербург, 2024. – С. 225–229.
2. Блинов П.В., Юрченко С. П. Помехозащищенность радиолинии с межсимвольной ППРЧ в условиях помех // Охрана, безопасность, связь, 2020, № 5-3 – С. 35–39.
3. Чуднов А.М., Кичко Я.В. Анализ помехозащищенности системы обмена данными группы робототехнических объектов // Экстремальная робототехника. 2024, № 1 (34) – С. 71–76.
4. Бестугин А.Р., Дворников С.В., Дворников С.С., Киршина И.А., Селиванов С.В. Помехозащищенность абонентских терминалов малых спутниковых станций в режиме телефонии // Радиотехника. 2024. Т.88. № 4. С.142-148.
5. Блинов П.В., Юрченко С.П. Помехозащищенность радиолинии с межсимвольной ППРЧ в условиях помех. 2020. № 5–3. С. 35–39.
6. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки // Монография. 2020. 337 с.
7. Генов А.А., Слепых А.А., Сухов А.В., Филатов В.И. Оценка воздействий случайных и преднамеренных помех на систему передачи данных с когнитивным псевдослучайным переключением рабочих частот // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – № 11.
8. Пшеничников А.В., Гордейчук А.Ю. Управление частотно-временным ресурсом помехозащищенных линий радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2020. – № 1. – С. 104–108.
9. Беккиев А.Ю., Борисов В.И. Оценка помехозащищенности каналов радиосвязи в условиях действия помех от средств радиоэлектронной борьбы// Радиотехника и электроника, 2019 – Т. 64, № 9, – С. 891-901.

## PRINCIPLES OF OPERATION OF A WIRELESS DATA TRANSMISSION NETWORK WITH FALSE SOURCES OF RADIO EMISSION

Chudnov A. M.<sup>1</sup>, Kurashhev Z.V.<sup>2</sup>

**Keywords:** intelligence protection, radio-emitting means, false sources of radio radiation, pseudo-subscribers.

**The purpose of the work** is to develop proposals that contribute to the effective use of false sources of radio emissions in the process of functioning of a wireless data transmission network.

**Research method:** analytical with the use of elements of set theory.

**Results:** the principles and options for the use of false radio emission sources considered in the work, as well as the examples of their interaction with objects of the wireless data transmission network with pseudorandom tuning of the operating frequency indicate the possibility of effective use of the subsystem of false radio emission sources in the communication system.

**The scientific novelty** lies in the development of a method for adaptive rearrangement of the algorithm of pseudorandom tuning of the operating frequency, which allows obtaining an additional gain in the efficiency of the radio link functioning, which, depending on the state of random (mutual) interference in the allocated frequency range, can be a significant value.

### References

1. Chudnov, A.M., Orlova A.A. Nastrojka algoritma perekljucheniya rabochnih chastot radiolinii, funkcionirujushhej v uslovijah sluchajnyh i prednamerennyh pomeh // Problemy tehničeskogo obespečenija vojsk v sovremennyh uslovijah: Trudy IX Mezhvuzovskoj nauchno-praktičeskoi konferencii: Sbornik materialov, Sankt-Peterburg, 2024. – S. 225–229.

<sup>1</sup>Alexander M. Chudnov, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated Special Purpose Systems of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail: chudnow@yandex.ru

<sup>2</sup>Zaur V. Kurashhev, Ph.D., Head of the Research Laboratory of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow Region, Mytishchi. E-mail: Frankilou@yandex.ru

2. Blinov P.V., Jurchenko S. P. Pomehozashhishhennost' radiolinii s mezhsimvol'noj PPRCh v uslovijah pomeh // Ohrana, bezopasnost', svjaz', 2020, № 5-3 – S. 35–39.
3. Chudnov A.M., Kichko Ja.V. Analiz pomehozashhishhennosti sistemy obmena dannymi grupy robototekhnicheskikh ob#ektov // Jekstremal'naja robototekhnika. 2024, № 1 (34) – S. 71–76.
4. Bestugin A.R., Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Kirshina I.A., Selivanov S.V. Pomehozashhishhennost' abonentskih terminalov malyh sputnikovyh stancij v rezhime telefonii // Radiotekhnika. 2024. T.88. № 4. S.142-148.
5. Blinov P.V., Jurchenko S.P. Pomehozashhishhennost' radiolinii s mezhsimvol'noj PPRCh v uslovijah pomeh. 2020. № 5–3. S. 35–39.
6. Makarenko S.I. Modeli sistemy svjazi v uslovijah prednamerennyh destabilizirujushhijh vozdeystvij i vedenija razvedki // Monografija. 2020. 337 s.
7. Genov A.A., Slepjy A.A., Suhov A.V., Filatov V.I. Ocenka vozdeystvij sluchajnyh i prednamerennyh pomeh na sistemu peredachi dannyh s kognitivnym psevdosluchajnym pereklyucheniem rabochih chastot // Zhurnal radioelektroniki. – 2023. – № 11.
8. Pshenichnikov A.V., Gordejchuk A.Ju. Upravlenie chastotno-vremennym resursom pomehozashhishhennyh linij radiosvjazi s programmnoj perestrojkoj rabochej chastoty// Voprosy radioelektroniki. Serija: Tehnika televidenija. – 2020. – № 1. – S. 104–108.
9. Bekkiev A.Ju., Borisov V.I. Ocenka pomehozashhishhennosti kanalov radiosvjazi v uslovijah dejstvija pomeh ot sredstv radioelektronnoj bor'by// Radiotekhnika i jelektronika, 2019 – T. 64, № 9, – S. 891-901.



# ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИГНАЛОВ С ПРОГРАММНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ И ЧАСТОТНО-ИНТЕРВАЛЬНЫМ КОДИРОВАНИЕМ

Лященко С.А.<sup>1</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-10-18

**Ключевые слова:** линия радиосвязи, оценка помехоустойчивости, деструктивное воздействие, сигнальная конструкция, модель радиолинии.

**Аннотация:** в статье описана разработанная модель помехоустойчивой сигнально-кодовой конструкции с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием, а также оценка ее помехоустойчивости в условиях деструктивного воздействия. В качестве показателя эффективности функционирования радиолинии использована вероятность ошибки приема элемента сигнала. Приводятся аналитические зависимости приема элемента сигнала от величины участка частот, на который оказывается деструктивное воздействие. Показано, что без дополнительных мер по повышению помехоустойчивости линий радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием обеспечивается их поражение помехой. Приводятся данные расчета, подтверждающие правомерность сделанных выводов.

**Цель работы** состоит в обосновании решения проблемы повышения помехоустойчивости линий радиосвязи путем применения сигналов с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием. Также в описании в описании формирования исследуемого сигнала.

**Результаты исследования:** В статье предложено решение задачи повышения помехоустойчивости, выраженное в синтезе применения основ методов теории сигналов, основ построения помехоустойчивых систем и теории систем. Описан процесс формирования сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием. Проведен сравнительный анализ зависимости символьной, битовой скоростей, количества битов информации, передаваемых в одном символе, эффективности использования канала и избыточности от различных комбинаций  $m$  и  $k$  сигнала ПЧМ при одинаковой ширине спектра сигнала. Предложена и описана модель предлагаемой сигнально-кодовой конструкции. Представлены графические зависимости вероятности ошибки приема элемента сигнала при использовании сигналов частотной модуляции, перестановочной модуляции и сигналом с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием.

**Научная новизна:** впервые предложено решение повышения помехоустойчивости линий радиосвязи, заключающееся в синтезе двух способов обработки сигнала, а именно в программной перестройке рабочей частоты и частотно-интервальном кодировании.

## Введение

Обеспечение помехоустойчивости линий радиосвязи, характеризующей способность обеспечения требуемого качества связи при воздействии преднамеренных помех, было и остается приоритетным направлением на всех этапах развития систем радиосвязи. Методы повышения помехоустойчивости линий радиосвязи представлены в работе [1]. Предложенные решения основываются на увеличении базы сигнала с использованием различных технологий.

В настоящее время одними из самых распространенных способов повышения качества радиосвязи при деструктивном воздействии на

радиолинии, являются использование сигналов с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) [3] и применение технологии многочастотной модуляции (МнЧМ) [2], исследованию особенностей которых и посвящена эта статья.

Вопросам поиска решения проблемы помехоустойчивости линий радиосвязи и исследованию физических свойств каналов радиосвязи посвящено большое количество работ [4, 13], в которых отмечается, что ограниченность частотного ресурса достаточно часто приводит к ситуациям, когда на выделенном для организации связи диапазоне частот наблюдается работа сторонних радиоэлектронных средств. Очевидно,

<sup>1</sup>Лященко Станислав Алексеевич, адъюнкт кафедры радиосвязи Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: parij61@mail.ru

что в таких условиях достаточно затруднительно обеспечить требуемое качество передающей информации. Поскольку достоверность принимаемой информации в этом случае будет выражена суммарным эффектом от воздействия помех и непосредственно канальных шумов.

Также, в работах [7] широко проанализированы основные аспекты помехоустойчивости средств радиосвязи (СРС) с ППРЧ в условиях деструктивного воздействия, а также приведен глубокий анализ помехоустойчивости типовых СРС с ППРЧ с М-ичной и двоичной частотной модуляцией. В работах [5, 6] уделено особое внимание перестановочной модуляции (ПЧМ) в различных технологиях передачи информации, а также в интересах выбора антенных систем множественной передачи и приема информации. В работе [8, 9, 12] предложено и доказано применение адаптивных методов обработки сигналов, а в [10] предложена интегральная модель радиолинии, обеспечивающая требуемые показатели эффективности ее функционирования.

Таким образом, дальнейшее направления развития проблематики повышения помехоустойчивости непосредственно связано в необходимости поиска решения своевременного перехода с частот, пораженных помехами, на частоты, удовлетворяющие требованиям ведения радиосвязи.

**Помехозащищенность сигналов с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием**

Решение поставленной задачи находится в синтезе применения основ методов теории сигналов, основ построения помехоустойчивых систем и теории систем.

Для описания процесса формирования сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием в линии радиосвязи (ЛРС) необходимо разработать ее функциональную модель, учитывающую применение первичной модуляции формируемого сигнала на основе принципа однополосной моду-

ляции, а так же расширение спектра формируемого сигнала в диапазоне 40 кГц методом программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) при соблюдении условия — база формируемого сигнала  $B \geq 10$ . Работа системы предусматривает условия ионосферного канала с логнормальными замираниями. В качестве манипулирующего сигнала в полосе частот 3,1 кГц выберем сигнал с перестановочной частотной модуляцией.

Задача состоит в обеспечении помехоустойчивости линии радиосвязи в условиях деструктивного воздействия и многолучевого распространения радиоволн, следовательно, наилучшие результаты могут быть получены при использовании в средствах радиосвязи сигнала с расширенным спектром.

Одним из таких методов является метод расширения спектра способом программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), базирующийся на изменении частоты и временного положения сигнала в соответствии со специальным кодом, формируемым на основе программной последовательности. Поскольку для передачи сообщений в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки применяются сигналы с ППРЧ, обладающие широким спектром, то выбор текущих значений рабочих частот должен исключить их взаимное влияние.

Применение принципа ППРЧ при формировании модели сигнальной конструкции сигнала с ППРЧ и частотно-интервальным кодированием, обеспечит препятствие эффективного воздействия на СРС организованных помех. При формировании сигнально-кодовой конструкции предлагаемого сигнала определим, что при расширении спектра методом ППРЧ, база формируемого сигнала  $B \geq 10$  [11], что позволит обеспечить более высокую скорость передачи информации, рациональное использование частотного ресурса и возможность оптимального и качественного резервирования частотных поддиапазонов формируемой СКК и оперирование ими в процессе передачи информации (рис.1).

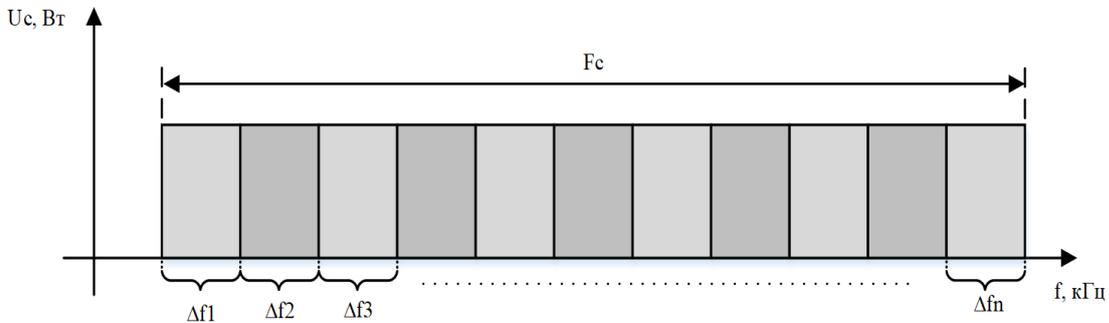


Рис.1. Шумоподобный сигнал с базой  $B \gg 10$

Введем понятие первичной модуляции формируемого сигнала, который будет служить в качестве «упаковки» в процессе передачи в линии радиосвязи.

В реальной системе связи сигнал в процессе передачи искажается и сообщение на выходе системы воспроизводится с некоторой ошибкой, которая может быть обусловлена такими факторами, как искажения, вносимыми самой системой (аппаратурные искажения), и искажения за счет воздействия внешних помех. В качестве модулирующего сигнала целесообразно использовать сигнал с однополосной модуляцией т.к. выигрыш в мощности передатчиков с однополосной модуляцией по отношению, например, к передатчикам с амплитудной модуляцией, превышает 16 раз в канале с переменными параметрами, а в вопросе помехоустойчивости однополосная модуляция обладает значительно более высокой помехоустойчивостью по сравнению с амплитудной модуляцией, особенно в условиях деструктивного воздействия.

В качестве манипулирующего сигнала, использующего для формирования сигнальных символов предлагается использовать сигнальную конструкцию, формируемую на основе кода с постоянным весом МТК-3, а именно перестановочной частотной модуляцией (ПЧМ) в полосе стандартного телефонного канала от 300 до 3 400 Гц. Полоса пропускания каждого подканала в общей занимаемой полосе частот  $\Delta W$  определяется как:

$$\Delta f_m = \frac{\Delta W}{m} = \frac{3400-300}{m} \quad (1)$$

Для ПЧМ-7/3 полоса пропускания подканала составляет:  $\Delta f_m = 443$  Гц, ПЧМ-8/1  $\Delta f_m = 388$  Гц. В качестве примера будет выбран ПЧМ-7/3, т.к. доказано [13], что при формировании СКК в части полосы, с  $m$ -общим количеством тоновых колебаний (для ПЧМ-7/3  $m = 7$ , ПЧМ-8/3  $m = 8$ ), и  $k$ -активными тоновыми колебаниями (для ПЧМ-7/3  $k = 3$ , ПЧМ-8/1  $k = 1$ ), уменьшение тоновых колебаний в символе ведет к повышению помехоустойчивости сигнально-кодовой конструкции в целом: для сигнала ПЧМ-8/1 — на 3дБ, для сигнала ПЧМ-7/2 — на 2дБ. При этом необходимо учесть, что наряду с уменьшением общего количества тоновых колебаний снижается информационная скорость на длительности импульса (табл.1). Следовательно, при выборе размерности СКК ПЧМ есть необходимость в поиске компромисса между помехоустойчивостью и информационной скоростью.

В таблице 1 представлена зависимость символьной, битовой скорости, количества битов информации, передаваемых в одном символе, эффективности использования канала и избыточности от различных комбинаций  $m$  и  $k$  сигнала ПЧМ при одинаковой ширине спектра сигнала.

Таблица 1

<b>m</b>	<b>32</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>7</b>
<b>k</b>	16	5	2	8	5	2	3
<b>B, бит</b>	29	13	7	13	12	4	5
<b>Rs, Бод</b>	96,875	172,2222	182,3529	193,75	193,75	387,5	442,8571

Модель предлагаемой сигнально-кодовой конструкции сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием предполагает две ветви обработки сигнала, причем каждая из предлагаемых ветвей предусматривает свой независимый алгоритм.

Определим, что выбранная сигнальная конструкция ПЧМ формируется в первой ветви обработки на основе частотной манипуляции с  $m$  ортогональными тоновыми колебаниями при излучении  $k$  тоновых колебаний одновременно, определяемых текущей кодовой последовательностью.

Агрегирование выбранных методов представим в виде следующей совокупности форма-

лизованных способов:

В каждой полосе частот в диапазоне 0,3–3,4к Гц формируется такой вид модуляции, который так же, как и сигнал перестановочной частотной модуляции, формирует ту же комбинацию информационных битов.

Выбирается равномерный двоичный семиэлементный равномерный код, число элементов которого строго соответствует числу доступных для передачи поднесущих частот на частотном интервале 0,3–3,4кГц.

Из всех доступных комбинаций равномерного двоичного кода исключены комбинации, в которых присутствуют только одни информационные единицы либо одни информационные нули.

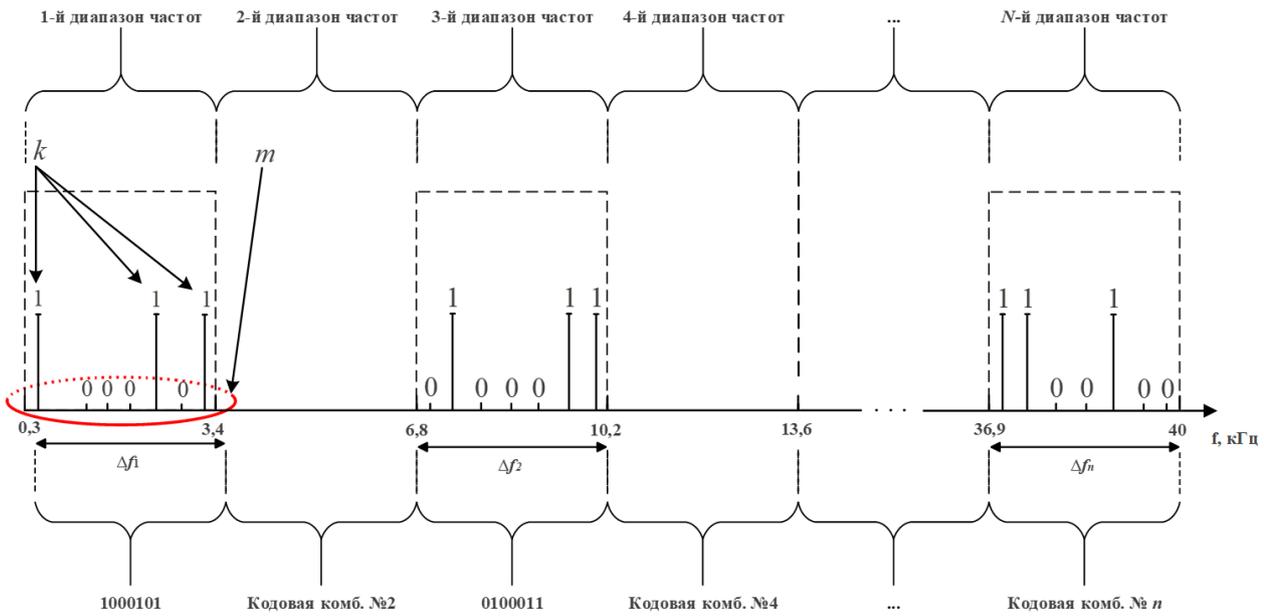


Рис. 2. Представление фрагмента обобщенной сигнально-кодовой конструкции сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием

Формируются сигналы в виде амплитудно-манипулированных колебаний на длительности каждого передаваемого символа только на тех поднесущих частотах, которым соответствуют информационные единицы, определяемые комбинацией элементов кода, причем формируют результирующий частотно-манипулированный сигнал (ЧМС) путем аддитивного сложения колебаний всех поднесущих частот.

Демодуляция ЧМС на поднесущих частотах осуществляется, как независимые частотно-разнесенные амплитудно-манипулированные колебания по критерию максимального правдоподобия, путем сравнения рассчитанного среднего значения мощности его спектральных компонент в пределах выделенных частотных полос каждой из поднесущих между собой.

Одновременно с формированием частотно-манипулированного сигнала во второй ветви системы формируется такой вид модуляции, который так же, как и сигнал перестановочной модуляции формирует ту же кодовую комбинацию и передается одновременно в том же частотном интервале, которому соответствует эта уникальная комбинация элементарного кода. Таким образом, формируется две ветви обработки в одном частотном диапазоне.

Величина канального алфавита определена, как все возможные комбинации из  $m = 7$  общего количества тоновых колебаний по  $k = 3$  активных и равна:

$$A_0 = C_m^k = \frac{m!}{k!(m-k)!} = C_7^3 = \frac{7!}{3!(7-3)!} = 35 \quad (2)$$

Битовый поток разбивается на информационные блоки, ставится в соответствие каждому информационному блоку свою уникальную комбинацию элементов кода (УКЭК), которая и определяет передаваемый символ. Для частотно-модулированного сигнала ПЧМ-7/3, который состоит из 7-ми поднесущих, остается  $A_{\text{ПЧМ-7/3}} = 2^B = 2^5 = 32$  разрешенных комбинаций, которые можно использовать для кодирования информационных блоков. Отсюда следует, что код из 32 комбинаций позволяет кодировать информационный блок, состоящий из 5 битов ( $B = 5$ ):

$$B = \left\lfloor \log_2 C_m^k \right\rfloor = \log_2 \left[ \frac{7!}{3!(7-3)!} \right] = 32 \quad (3)$$

При этом выбор УКЭК для кодирования информационных блоков может осуществляться в произвольном порядке.

В соответствии с обобщенной структурно-функциональной моделью линии декаметровый связи с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием (рис.2), а также, ввиду того, что предметом рассмотрения определен сигнал, передаваемый от дискретного источника сообщений, то показателем эффективности функционирования радиолинии на физическом уровне является вероятность

символьной ошибки  $P_{\text{ош}}$  на временном интервале  $0 - t_1$ .

Расчет вероятности ошибки элемента сигнала целесообразно провести, основываясь на аналогичные расчеты при некогерентном приеме сигналов многочастотной модуляции по огибающей, в процессе которого, принимаемые сигналы после проходного фильтра разделяются двумя узкополосными фильтрами и поступают на детекторы огибающих. Напряжения поступающих сигналов с выходных детекторов сравниваются между собой устройством сравнения, а итоговое решение принимается по наибольшему напряжению.

Очевидно, на выходе фильтра без сигнала действует только напряжение помех  $U_{\text{п}}$ , а на выходе фильтра с сигналом — напряжение суммы сигнала и помех  $U_{\text{сп}}$ . В общем случае напряжения  $U_{\text{п}}$  и  $U_{\text{сп}}$  являются случайными величинами с плотностями распределения вероятностей  $\omega(U_{\text{п}})$  и  $\omega(U_{\text{сп}})$ . Сигнал в момент детектирования будет воспроизведен неправильно при условии, если  $U_{\text{сп}} < U_{\text{п}}$ . Отсюда, вероятность ошибки элемента сигнала при равных вероятностях передачи посылок нажатия и отжатия будет определяться выражением:

$$P_{\text{ош}} = \int_0^{\infty} \omega(U_{\text{сп}}) \left[ \int_{U_{\text{сп}}}^{\infty} \omega(U_{\text{п}}) dU_{\text{п}} \right] dU_{\text{сп}} \quad (4)$$

Если на вход приемника действует помеха типа «белый шум», то на выходе фильтра без сигнала огибающая помех  $U_{\text{п}}$  имеет рэлеевскую плотность распределения:

$$\omega(U_{\text{п}}) = \frac{2U_{\text{п}}}{U_{\text{п}_\text{эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_{\text{п}}^2}{U_{\text{п}_\text{эф}}^2}\right), \quad (5)$$

где  $U_{\text{п}_\text{эф}}$  — эффективное напряжение помех. При рассмотрении канала декаметрового диапазона с переменными параметрами (релеевскими замираниями), амплитуда сигнала имеет плотность вероятностей:

$$\omega(U_{\text{мс}}) = \frac{2U_{\text{мс}}}{U_{\text{с}_\text{эф}}^2} \exp\left(-\frac{U_{\text{мс}}^2}{U_{\text{с}_\text{эф}}^2}\right), \quad (6)$$

$U_{\text{с}_\text{эф}}$  — эффективное напряжение сигнала.

Превышение сигнала над помехой  $h = \frac{U_{\text{мс}}}{U_{\text{п}_\text{эф}}}$

является случайной величиной с плотностью распределения вероятностей:

$$\omega(h) = \frac{2h}{h_0^2} \exp\left(-\frac{h^2}{h_0^2}\right), \quad (7)$$

где  $h_0 = \frac{U_{\text{с}_\text{эф}}}{U_{\text{п}_\text{эф}}}$ , — среднее превышение сигнала над помехами в канале с замираниями. Отсюда,

$$\frac{h}{h_0} = \frac{U_{\text{мс}}}{U_{\text{с}_\text{эф}}}. \quad (8)$$

Произведем интегрирование по  $dh$ :

$$P_{\text{ош ЧТ}} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) \omega(h) dh = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) \frac{2h}{h_0^2} \exp\left(-\frac{h^2}{h_0^2}\right) dh = \frac{1}{2+h_0^2} \quad (9)$$

Тем самым нашли вероятность символьной ошибки при некогерентном приеме для сигнала ЧМн-2 (ЧТ) в канале с переменными параметрами (канал с замираниями).

При  $m > 2$ , то есть для сигналов  $S_1, S_2, \dots, S_m$ , вероятность ошибки можно вычислить согласно выражению:

$$P_{\text{ош ЧМн}} = P_{\text{ош}}(S_1, S_2, S_3, \dots, S_m) \quad (10)$$

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, вероятность символьной ошибки при равных значениях вероятности передачи информационных «нуля» и «единицы» представим в виде:

$$P_{\text{ош ЧМн}} = \int_0^{\infty} \omega(S_1) dS_1 \int_{S_1}^{\infty} \omega(S_2) dS_2 \times \dots \times \int_{S_1}^{\infty} \omega(S_m) dS_m \quad (11)$$

Приближенным представлением выражения (11) является выражение:

$$P_{\text{ош ЧМн}} = \frac{m-1}{2} \exp\left(-\frac{h_0^2}{2}\right) \quad (12)$$

где  $m$  — число субканалов в символе ЧМ- $m$  ( $m = 8$  для сигналов ЧМн-8). Тем самым нашли вероятность символьной ошибки при некогерентном приеме для сигнала многочастотной модуляции в канале с переменными параметрами (канал с замираниями). Для сигнала перестановочной модуляции при некогерентном приеме в канале с переменными параметрами выражение (12) примет вид:

$$P_{\text{ош}} = \sum_{n=1}^{k-1} (-1)^{n+1} C_{k-1}^n \frac{1}{nh_0^2 + n+1} \quad (13)$$

Далее, для расчета вероятности ошибочного приема элемента сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием, определим общую вероятность ошибки приема элемента сигнала, с учетом работы системы по двум независимым ветвям обработки.

Известно, что для наиболее широко используемых дискретных сигналов достоверность количественно оценивается вероятностью ошибочного приема элемента сигнала (символа, посылки)  $P_{\text{ош}}$  ( $0 \leq P_{\text{ош}} \leq 0,5$ ). При аппаратурных испытаниях оценкой этой вероятности служит отношение числа искаженных символов  $N_{\text{иск}}$  к общему числу переданных символов  $N$ :

$$P_{\text{ош}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск}}}{N_{\text{пер}}} \quad (14)$$

Учитывая тот факт, что при передаче информации, применяется способ его обработки по двум независимым каналам на приемной стороне, вероятность ошибочного приема элемента сигнала после его демодуляции будет равна:

$$P_{\text{ош.обш.}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск.}Q1} + N_{\text{иск.}Q2}}{N_{\text{пер}}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск.}Q1}}{N_{\text{пер}}} + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{иск.}Q2}}{N_{\text{пер}}} \quad (15)$$

откуда  $N_{\text{пер}} = N_{\text{иск.}Q1} + N_{\text{иск.}Q2}$ .

Далее определим вероятность ошибки приема элемента сигнала при работе радиолинии в режиме программной перестройки при использовании  $m$ -рабочих частот в соответствии с выражением расчета общей вероятности ошибки системы:

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \lim_{L_{\text{пер}} \rightarrow \infty} \frac{L_{\text{иск } \Sigma}}{L_{\text{пер}}} \quad (16)$$

где  $L_{\text{иск } \Sigma}$  — общее количество искаженных элементов сигнала в радиолинии с ППРЧ на интервале стационарности параметров функций распределения Релея ( $L_{\text{иск } \Sigma} = L_{\text{иск } 1} + L_{\text{иск } 2} + \dots + L_{\text{иск } m}$ );

$L_{\text{пер}}$  — количество элементов сигнала, передаваемых за время  $0-t1$  ( $L_{\text{пер}} = L_{\text{пер } 1} + L_{\text{пер } 2} + \dots + L_{\text{пер } m}$ ).

Представим выражение (16) в виде:

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \lim_{L \rightarrow \infty} \left( \frac{L_{\text{иск } 1}}{L_{\text{пер } 1}} \frac{L_1}{L_1} + \frac{L_{\text{иск } 2}}{L_{\text{пер } 2}} \frac{L_2}{L_2} + \dots + \frac{L_{\text{иск } m}}{L_{\text{пер } m}} \frac{L_m}{L_m} \right) \quad (17)$$

при условии, что  $L_i \rightarrow \infty$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), а также, учитывая выражение (17) и свойства пределов, вероятность ошибки приема элемента сигнала в радиолинии с ППРЧ определим, как

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{\text{ош } i}, \quad (18)$$

где  $P_{\text{ош } i}$  — вероятности ошибки приема элемента сигнала на каждой частоте ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), которые не изменяются на интервалах  $0-t_1, t_1-t_2, \dots, t_{k-1}-t_k$ .

Подставив (12) в выражение (18) и взяв во внимание стационарность величины вероятности ошибки на каждой частоте получим:

$$P_{\text{ош ППРЧ}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{m-1}{2} \exp\left(-\frac{h_0^2}{2}\right) \quad (19)$$

Далее, с учетом выражения (18) и известного выражения расчета вероятности ошибки приема элемента сигнала перестановочной частотной модуляции в канале с переменными параметрами, получим выражение для расчета вероятности ошибки приема элемента сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием в канале с переменными параметрами:

$$P_{\text{ош ППРЧ}} \text{ и ЧИК} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^{k-1} \sum_{i=1}^m \frac{(m-1)}{2} (-1)^{n+1} C_{k-1}^n \frac{1}{nh^{2+n+1}} \quad (20)$$

На рисунке 3 для различных каналов связи представлены графические зависимости  $P_{\text{ош}} = f(h_0)$  при использовании сигналов частотной модуляции, перестановочной модуляции и сигналом с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием.

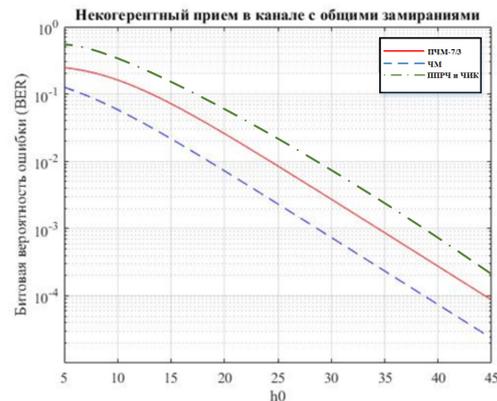


Рис.3. Помехоустойчивость дискретных сигналов в канале с переменными параметрами без воздействия преднамеренных помех

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что сигналы с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-

интервальным кодированием обла-дают худшей помехоустойчивостью, по сравнению с сигналами ЧМ и ПЧМ-7/3. Это обусловлено шириной спектра сигнала ППРЧ и ЧИК, занимаемой частотную ось в диапазоне 40кГц, на всей величине которого действуют непреднамеренные помехи, на ряду как спектр сигнала ЧМ и ПЧМ не больше 3,1 кГц. Но выигрыш сигнала с программной перестройкой рабочей частоты и частотно-интервальным кодированием будет виден при работе системы в условиях сложной помеховой обстановки.

### Заключение

Направление дальнейших исследований видится в уточнении параметров разработанной модели при наличии деструктивного воздействия и подходов к оценке эффективности полученной обобщенной модели, а также в необходимости поиска решений по повышению помехоустойчивости линии радиосвязи с ППРЧ и частотно-интервальным кодированием путем разработки алгоритма подбора и резервирования непораженных помехой участков частот.

### Литература

1. Дворников С.В., Марков Е.В. Маноши Э.А. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // Т-Comm - Т.15: Телекоммуникации и транспорт. — 2021. — №6. С. 4–9. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9
2. Дворников С.В., Балыков А.А. Предложения по повышению скоростью передачи и помехоустойчивостью сигналов с перестановочной модуляцией // Электроника. Радиотехника, Т Comm Том 14. — 2020. — №6. С.20-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26
3. Блинов П.В., Юрченко С.П. Помехозащищенность радиолинии с межсимвольной ППРЧ в условиях помех // Охрана, безопасность, связь. — 2020. — № 5–3. С. 35–39.
4. Русин А.А., Бибарсов М.Р., Аюков Б.А., Гордиенко Д.Ю., Лященко С.А., Дворников С.В., Устинов А.А. Анализ потерь помехоустойчивости в условиях медленных замираний // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. — 2022. — №. 1. С. 81–85.
5. Дворников С.В., Балыков А.А., Дворников С.С., Попов Е.А. Помехоустойчивость сигналов с перестановочной частотной модуляцией в каналах с постоянными параметрами при некогерентном приеме // Радиотехника. — 2019. — №. 12. С.24-31. DOI: 10.18127/00338486-201912(20)-04
6. Дворников С.В., Балыков А.А., Пшеничников А.В., Овчинников Г.Р., Присяжнюк А.С. Способ передачи информации по коротковолновому каналу связи с использованием частотно-манипулированных сигналов. Патент РФ № 2 705 357, от 11.04.2019, опубликован: 07.11.2019 Бюл. № 31.
7. Бредихина Е.В., Колбая К.Ч., Косинов Е.С, Савельев М.А. Совершенствование алгоритмов управления автоматизированных частотно-адаптивных линий декаметровой связи // Теория и техника радиосвязи. — 2024. — №. 1. С. 92–98.
8. Федоров И.В., Липатников В.А., Белов А.В. Повышение помехоустойчивости адаптивного радио в условиях случайной сигнально-помеховой обстановки // Интернаука. — 2021. — №. 41 – 1 (217).
9. Марков Е.В., Дворников С.В. Способы повышения помехозащищенности декаметровой линии радиосвязи посредством использования широкополосных сигналов с адаптивно изменяющейся базой // В сборнике: Технологии. Инновации. Связь. Сборник материалов научно-практической конференции. Санкт-Петербург. – 2022. – С. 238 – 242.
10. Балыков А.А. Модель канала декаметровой радиосвязи, учитывающая влияние скользящей по спектру помехи // Информация и космос. — 2020. — №. 1.
11. Дворников С.В., Дворников С.С., Жеглов К.Д. Помехоустойчивость сигналов однополосной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания // Информатика и автоматизация. — 2023. — № 2. – С. 261 - 288.
12. Марков Е.В. Повышение помехоустойчивости коротковолновых линий радиосвязи в условиях релейских и райсовских замираний // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. — 2023. — № 3. – С. 129- 135.
13. Тишков В.В., Иванов В.Г., Лукьянчик В.Н., Обоснование облика построения перспективных комплексов и средств на основе опыта организации связи при проведении специальной военной операции. Москва.: Военная мысль №9, 2023. С. 59-72.

# INTERFERENCE IMMUNITY OF SIGNALS WITH PROGRAMMED FREQUENCY HOPPING AND FREQUENCY-INTERVAL CODING

*Lyashchenko S.A.<sup>1</sup>*

**Keywords:** radio communication line, noise immunity assessment, destructive impact, signal design, radio line model.

**Abstract:** The paper describes the developed model of noise-resistant signal-code design with programmed tuning of operating frequency and frequency-interval coding, as well as the evaluation of its noise immunity under destructive impact. As an indicator of the efficiency of the radioline is used the probability of error in the reception of the signal element. Analytical dependences of the reception of the signal element on the value of the frequency section, which is destructive impact. It is shown that without additional measures to improve noise immunity of radio communication lines with programmed tuning of the operating frequency and frequency-interval coding provides their defeat by interference. The calculation data confirming the validity of the conclusions are given.

**The purpose of the work** is to substantiate the solution of the problem of improving noise immunity of radio communication lines by using signals with program tuning of the operating frequency and frequency-interval coding. Also in the description of the formation of the studied signal.

**Results:** The article proposes a solution to the problem of improving noise immunity, expressed in the synthesis of the application of the basics of signal theory methods, the basics of building noise-immune systems and system theory. The process of signal formation with program tuning of operating frequency and frequency-interval coding is described. A comparative analysis of the dependence of symbol, bit rates, the number of bits of information transmitted in one symbol, channel utilization efficiency and redundancy on various combinations of  $m$  and  $k$  of the IFM signal at the same width of the signal spectrum is carried out. A model of the proposed signal-code design is proposed and described. Graphical dependences of the probability of error probability of a signal element when using frequency modulation signals, permutation modulation and signal with programmed tuning of the working frequency and frequency-interval coding are presented.

**Scientific novelty:** for the first time proposed a solution to improve noise immunity of radio communication lines, which consists in the synthesis of two methods of signal processing, namely in the program tuning of the operating frequency and frequency-interval coding.

## References

1. Dvorkov S.V., Markov E.V. Manoshi Je.A. Povyshenie pomehozashhishhennosti peredach dekametrovyyh radiokanalov v usloviyakh neprednamerennykh pomeh // T-Somm - T.15: Telekommunikacii i transport. — 2021. — №6. S. 4–9. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9
2. Dvornikov S.V., Balykov A.A. Predlozheniya po povysheniju skorost'ju peredachi i pomehoustojchivost'ju signalov s perestanochnoj moduljaciej // Jelektronika. Radiotekhnika, T Somm Tom 14. — 2020. — №6. S.20-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26
3. Blinov P.V., Jurchenko S.P. Pomehozashhishhennost' radiolinii s mezhsimvol'noj PPRCh v usloviyakh pomeh // Ohrana, bezopasnost', svjaz'. — 2020. — № 5–3. S. 35–39.
4. Rusin A.A., Bibarsov M.R., Ajukov B.A., Gordienko D.Ju., Ljashhenko S.A., Dvornikov S.V., Ustinov A.A. Analiz poter' pomehoustojchivosti v usloviyakh medlennykh zamiraniij // Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika teledivenija. — 2022. — №. 1. S. 81–85.
5. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Dvornikov S.S., Popov E.A. Pomehoustojchivost' signalov s perestanochnoj chastotnoj moduljaciej v kanalakh s postojannymi parametrami pri nekogerentnom prieme // Radiotekhnika. — 2019. — №. 12. S.24-31. DOI: 10.18127/j00338486-201912(20)-04
6. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Pshenichnikov A.V., Ovchinnikov G.R., Prisjazhnyuk A.S. Sposob peredachi informacii po korotkovolnovomu kanalu svjazi s ispol'zovaniem chastotno-manipulirovannykh signalov. Patent RF № 2 705 357, ot 11.04.2019, opublikovan: 07.11.2019 Bjul. № 31.
7. Bredihina E.V., Kolbaja K.Ch., Kosinov E.S, Savel'ev M.A. Sovershenstvovanie algoritmov upravlenija avtomatizirovannykh chastotno-adaptivnykh linij dekametrovoj svjazi // Teorija i tehnika radiosvjazi. — 2024. — №. 1. S. 92–98.
8. Fedorov I.V, Lipatnikov V.A., Belov A.V. Povyshenie pomehoustojchivosti adaptivnogo radio v usloviyakh sluchajnoj signal'no-pomehovej obstanovki // Internauka. — 2021. —№. 41 – 1 (217).

---

<sup>1</sup>Stanislav A. Lyashchenko, Adjunct of the Department of Radio Communications, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: parij61@mail.ru

9. Markov E.V., Dvornikov S.V. Sposoby povyshenija pomehozashhishhennosti dekametrovoj linii radiosvjazi posredstvom ispol'zovanija shirokopolosnyh signalov s adaptivno izmenjajushhejsja bazoj // V sbornike: Tehnologii. Innovacii. Svjaz'. Sbornik materialov nauchno-prakticheskoj konferencii. Sankt-Peterburg. – 2022. – S. 238 – 242.
10. Balykov A.A. Model' kanala dekametrovoj radiosvjazi, uchityvajushhaja vlijanie skol'zjashhej po spektru pomehi // Informacija i kosmos. — 2020. — №. 1.
11. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Zheglov K.D. Pomehoustojchivost' signalov odnopolosnoj moduljacji s upravljaemym urovnem nesushhego kolebanija // Informatika i avtomatizacija. — 2023. — № 2. — S. 261 - 288.
12. Markov E.V. Povyszenie pomehoustojchivosti korotkovolnovyh linij radiosvjazi v uslovijah releevskih i rajsovskih zamiraniij // Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika televidenija. — 2023. — № 3. — S. 129 - 135.
13. Tishkov V.V., Ivanov V.G., Luk'janchik V.N., Obosnovanie oblika postroenija perspektivnyh kompleksov i sredstv na osnove opyta organizacii svjazi pri provedenii special'noj voennoj operacii. Moskva.: Voennaja mysl' №9, 2023. S. 59-72.



# ФИЗИКО-ПЛАНИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ

Усацкий В.А.<sup>1</sup>, Селезнев А.В.<sup>2</sup>, Волков В.А.<sup>3</sup>

DOI: 10.21681/3034-4050-2025-2-19-24

**Ключевые слова:** радиально-кольцевая структура, кольцевая структура, оптимизация, волоконно-оптический кабель.

## Аннотация

**Цель работы** — на основе проведенного анализа базовых типовых структур оптической транспортной сети специального назначения, сформулировать предложения по практической реализуемости физико-планиметрического метода определения центра тяжести для вычисления оптимальной координаты размещения центрального оптического транспортного узла связи в пределах радиально-кольцевой структуры оптической сети с учетом динамики развития.

## Метод исследования:

1. Положительно зарекомендовавший себя в транспортной логистике физико-планиметрический метод определения центра тяжести.

2. Физико-планиметрический метод определения центра тяжести предлагается по аналогии применять для определения оптимального расположения центрального транспортного узла оптической транспортной сети радиально-кольцевой структуры.

**Результаты исследования:** в результате проведения анализа базовых типовых структур и обоснования условий физической реализуемости оптической транспортной сети специального назначения по аналогии с физико-планиметрическим методом определения центра тяжести для масс тел на плоскости, предложен подход к введению в пределах радиально-кольцевой структуры оптической транспортной сети, центрального дополнительного транспортного узла с учетом минимизации расхода используемого волоконно-оптического кабеля.

На основе предложенного подхода произведено уточнение соответствующей математической модели, учитывающее динамику перемещения транспортных узлов, то есть динамику развития сети связи.

**Практическая ценность:** полученные научные результаты позволяют производить расчеты для построения оптимальных, с точки зрения минимизации расхода используемого волоконно-оптического кабеля, структур оптических транспортных сетей специального назначения радиально-кольцевого типа. При этом обеспечивается выполнение требований к структурной отказоустойчивости и минимизации времени на решение отдельных оптимизационных задач планирования и организации волоконно-оптической связи с учетом изменения обстановки по связи.

## Введение

Анализ топологических структур транспортных сетей связи (ТС) Единой сети электросвязи РФ показал [1, 2], что в настоящее время их оптический слой в основном образуется на основе развертываемых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) общего пользования и специального назначения (СН) с прокладкой волоконно-оптических кабелей (ВОК) и (или) использованием арендованного ресурса волоконно-оптической инфраструктуры (ВОИ) регио-

нальных операторов связи субъектов РФ в виде оптических волокон (ОВ) и длин волн (ДВ) в заранее проложенных стационарных ВОК.

Все ВОИ и ВОК специального назначения позволяют не только строить оси и рокады (линейные структуры) оптических ТС (ОТС), но и формировать различные отказоустойчивые типовые топологические структуры (кольцевые (КС), радиально-кольцевые (РКС) и др.) в оптическом диапазоне передачи высокоскоростных информационных потоков (ИП) [3].

<sup>1</sup>Усацкий Владимир Анатольевич, преподаватель Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail:usvovan@yandex.ru

<sup>2</sup>Селезнев Андрей Васильевич, научный сотрудник НИО Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail:andrsel@mail.ru

<sup>3</sup>Волков Владислав Александрович, адъюнкт Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail:volkovvladik@mail.ru

Опыт построения более сложных топологических структур показывает невозможность реализовывать их с малыми затратами на прокладку дорогостоящих ВОК [4, 5], а также трудность внедрения оптического оборудования на оптических транспортных узлах связи (ОТУ) с учетом обеспечения требований к структурной отказоустойчивости и минимизации времени на решение отдельных оптимизационных задач формирования структуры ОТС с узловой основой (УО) в ходе изменения обстановки по связи.

Для повышения оперативности принятия решения по целесообразности развертывания высокоустойчивых КС, РКС и радиально-многокольцевых структур [6, 7] при формировании УО ОТС СН, возникает необходимость исследования возможности переноса методом аналогии известного решения физической задачи по нахождению центра тяжести (ЦТ) для множества координат расположения масс тел на плоскости (планиметрия) [8]. То есть, для решения подобной задачи из области электросвязи по формированию структуры ОТС с учетом введения дополнительного ОТУ, предлагается использовать физико-планиметрический метод (ФПМ) нахождения ЦТ [8], который нашел широкое применение в транспортной логистике [9, 10].

Применение такого подхода к расчетам в области электросвязи для решения задачи по нахождению ЦТ определяет новизну настоящего исследования, т.к. предлагаемый метод оптимального вычисления координаты дополнительно вводимого ОТУ с учетом минимизации суммарного расхода ВОК заимствуется из области механики в физике в область информатики по оптимизации передачи ИП с учетом:

- построения наиболее рациональной и структурно отказоустойчивой топологической структуры ОТС с коэффициентом связности три для передачи световых ИП по независимым путям;
- динамики развития ОТС за счет перемещения на местности ее отдельных ОТУ и необходимости определения очередного наиболее оптимального расположения на местности дополнительно вводимого центрального ОТУ для реконфигурации топологической структуры сети из образованной ранее КС или РКС в уточненную в ходе динамики развития новую РКС, т.е. динамики перехода РКС сети из состояния №1 ( $S_1$ ) в состояние №2 ( $S_2$ ).

### **1. Анализ базовых типовых структур и условия физической реализуемости оптической транспортной сети специального назначения**

Для сравнительного анализа базовых типовых структур с позиции обеспечения требова-

ний к структурной отказоустойчивости ОТС чаще всего используют базовые типовые структуры, где [3, 11]:

- типовая радиальная структура (РС), будучи односвязной с числом ребер  $N$ , имеет центральную вершину (ОТУ), через которую передается множество ИП в световом диапазоне ДВ или ОВ, а между центральной вершиной и другими узлами из множества вершин графа (ОТУ) имеют место линейные структуры;
- типовая КС, в которой ОТУ соединены ребрами (ВОК) в кольцо, а между любыми ОТУ имеются два световых пути по ОВ, т.е. сеть — двухсвязная с числом ребер  $N$ .

Для получения возможности более обоснованного выбора предпочтительной базовой типовой топологической структуры в той или иной сложившейся ситуации построения ОТС, а также для обеспечения в дальнейшем возможности системного проектирования высокоустойчивых ОТС (с коэффициентом связности три), в научных работах проведен сравнительный анализ типовых РС и КС для их совместного использования с учетом сравнения относительных коэффициентов эффективности в среднегармоническом и среднегеометрическом представлении [11, 12].

Логично предположить, что совместное использование РС и КС в формируемой РКС может быть достигнуто путем нахождения оптимального размещения центральной вершины (центрального ОТУ) РС относительно координат расположения ОТУ из состава КС формируемой ОТС с требуемым коэффициентом связности для любого оптического транспортного направления (ОТН).

Для решения данной сетевой задачи, методом аналогии выберем положительно зарекомендовавший себя в транспортной логистике физико-планиметрический метод определения центра тяжести [9], который оказался наиболее экономически предпочтительным в сравнении с другими методами определения ЦТ (Штейнера, к-средних и др.). Однако в непосредственном представлении на практике построения логистических систем по транспортировке грузов, в соответствующих методиках и алгоритмах не отражена динамика возможного смещения (передвижения) ЦТ (базы или склады), что является существенным недостатком.

При планировании организации связи на основе ВОСП должна учитываться динамика возможного изменения топологической структуры ОТС в результате перемещения отдельных ОТУ, что требует проводить научные исследования по разработке соответствующих методик и алгоритмов реконфигурации структуры ОТС с учетом

обеспечения, следующих пяти условий физической реализуемости (УФР):

- требуемая структурная отказоустойчивость сети, оцениваемая через коэффициент связности не менее двух для КС, не должна снижаться;
- затраты времени на проведение расчетов на решение задачи по реконфигурации структуры должно быть минимальным;
- применяемый в методике и алгоритме метод реконфигурации должен обеспечивать минимизацию расхода общей длины ВОК на введение дополнительного центрального ОТС в известную УО топологической структуры сети;
- применяемые методы решения подобного класса транспортных задач должны обеспечивать необходимую точность не только для сетей малой размерности (до 4-х ОТУ), но и для ОТС большей размерности — до 10-ти и больше 10-ти;
- в разрабатываемой методике с используемым обоснованным методом должна учитываться динамика изменения структурных свойств узловой основы ОТС.

Следовательно, остановимся более подробно на применении ФПМ из транспортной логистики для реконфигурации структуры ОТС путем введения дополнительного ОТУ в УО в динамике изменения топологической структуры сети, где динамика перехода из первого состояния структуры  $S_1$  относительно исходного времени  $t_1$  во второе состояние структуры  $S_2$  за время  $\Delta t$  определяется следующим выражением:

$$t_1 + \Delta t = t_2, \quad (1)$$

## 2. Физико-планиметрический метод введения в структуру оптической транспортной сети дополнительного транспортного узла

Широкое заимствование из планиметрии решения задачи по определению единственного центра масс любой системы точек нашло в логистике при определении координаты ЦТ между создаваемым распределительным складом оптовой торговли и известными координатами супермаркетов (магазинами). Координаты ЦТ в виде создаваемого распределительного склада определяются следующим образом [9, 10]:

$$x_0 = \frac{\sum x_i W_i}{\sum W_i}, \quad y_0 = \frac{\sum y_i W_i}{\sum W_i}, \quad (2)$$

где:

$(x_0, y_0)$  — неизвестные координаты ЦТ, определяющие место расположения распределительного склада оптовой торговли;

$(x_i, y_i)$  — известные координаты для  $i$ -х магазинов (потребителей);

$W_i$  — известные параметры ожидаемого спроса на товары  $i$ -ми магазинами, т.е. масса (тяжесть) или грузооборот товаров.

Используя метод динамических аналогий по отношению к (2), произведем замену понятий применительно к определению координаты дополнительно вводимого одного ОТУ в структуру ОТС, что позволяет получить следующую систему из двух выражений:

$$x_{2,j=1}(t_1) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} x_{1,i}(t_1) \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_1)}{\sum_{i=1}^{N_1} \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_1)}, \quad y_{2,j=1}(t_1) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} y_{1,i}(t_1) \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_1)}{\sum_{i=1}^{N_1} \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_1)}, \quad (3)$$

где:

$(x_{2,j=1}(t_1) \equiv x_0; y_{2,j=1}(t_1) \equiv y_0)$  — искомые координаты ЦТ, определяющие место расположения дополнительно вводимого ОТУ  $a_{2,j=1}(t_1) \in A_2$ ;

$(x_{1,i}(t_1) \equiv x_i; y_{1,i}(t_1) \equiv y_i)$  — известные координаты ОТУ  $a_{1,i}(t_1) \in A_1$ ;

$\max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_1) \equiv W_i$  — известные параметры суммарного потенциально возможного (максимального) информационного веса для каждого  $a_{1,i}(t_1) \in A_1$ , который может выражаться в количестве ОБ в ВОК, числе ДВ во всех ОБ или в суммарных значениях групповых скоростей передачи (Гбит/с) в соответствующих коммутационных устройствах ОТУ.

В качестве примера №1 (состояние  $S_1$ ) произведем расчеты координат с помощью (3) для дополнительно вводимого  $a_{2,1}(t_1) \in A_2$  в узловой основе  $A = A_1 \cup A_2$  при следующих заданных координатах в километрах для  $a_{1,j=1..5}(t_1) \in A_1$ :  $a_{1,1}(t_1) = (5; 20)$ ,  $a_{1,2}(t_1) = (30; 35)$ ,  $a_{1,3}(t_1) = (40; 25)$ ,  $a_{1,4}(t_1) = (45; 15)$ ,  $a_{1,5}(t_1) = (20; 10)$ . Также заданы следующие информационного веса для каждого из  $a_{1,j=1..5}(t_1) \in A_1$ :  $\max V_{a_{1,1} \in A_1}(t_1) = 60$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,2} \in A_1}(t_1) = 50$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,3} \in A_1}(t_1) = 10$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,4} \in A_1}(t_1) = 20$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,5} \in A_1}(t_1) = 30$  Гбит/с.

В результате расчетов по формулам (3) для дополнительно вводимого  $a_{2,1}(t_1) \in A_2$  с точностью до одного знака после запятой получены следующие координаты:  $x_{2,1}(t_1) = 21$  км;  $y_{2,1}(t_1) \approx 22,9$  км.

## 3. Реконфигурация оптической транспортной сети на основе физико-планиметрического метода с учетом динамики перемещения транспортных узлов в кольцевой структуре

Для учета динамики перемещения (реконфигурации) ОТУ при переходе из состояния  $S_1$  в

состояние  $S_2$  за время  $\Delta t$  в соответствии с формулой (1) преобразуем выражение (3) в следующий вид:

$$x_{2,j=1}(t_2) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} x_{1,i}(t_2) \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_2)}{\sum_{i=1}^{N_1} \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_2)}, \quad y_{2,j=1}(t_2) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} y_{1,i}(t_2) \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_2)}{\sum_{i=1}^{N_1} \max V_{a_{1,i} \in A_1}(t_2)}. \quad (4)$$

В качестве примера №2 (состояние  $S_2$ ) произведем расчеты координат с помощью (4) для дополнительно вводимого  $a_{2,1}(t_2) \in A_2$  в узловой основе  $A = A_1 \cup A_2$  при следующих заданных координатах в километрах для  $a_{1,i=1,5}(t_2) \in A_1$ :  $a_{1,1}(t_1, t_2) = (5; 20)$ ,  $a_{1,2}(t_2) = (25; 45)$ ,  $a_{1,3}(t_2) = (50; 35)$ ,  $a_{1,4}(t_1, t_2) = (45; 15)$ ,  $a_{1,5}(t_1, t_2) = (20; 10)$ . Также заданы следующие информационного веса для каждого из  $a_{1,i=1,5}(t_2) \in A_1$   $\max V_{a_{1,1} \in A_1}(t_2) = 40$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,2} \in A_1}(t_2) = 50$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,3} \in A_1}(t_2) = 10$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,4} \in A_1}(t_2) = 20$  Гбит/с,  $\max V_{a_{1,5} \in A_1}(t_2) = 10$  Гбит/с.

В результате расчетов по формулам (4) для дополнительно вводимого  $a_{2,1}(t_2) \in A_2$  с точностью до одного знака после запятой получены следующие координаты:  $x_{2,1}(t_2) \approx 23,5$  км;  $y_{2,1}(t_2) \approx 29,2$  км.

Для наглядности на рисунке 1 приведены рассчитанные с помощью (3) и (4) координаты, предлагаемые с целью дополнительного введения в радиальную структуру ОТУ  $a_{2,1}(t_1) \in A_2$  и  $a_{2,1}(t_2) \in A_2$  с учетом:

- динамики перехода за время  $\Delta t$  с сохранением структурной отказоустойчивости с коэффициентом связности два для КС в процессе перехода из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$ ;
- обеспечения структурной отказоустойчивости с коэффициентом связности три для РКС в стационарном  $S_2$ , который был обеспечен изначально в состоянии  $S_1$ .

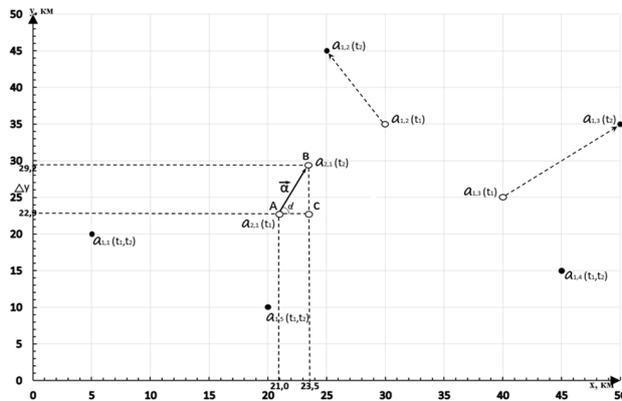


Рис. 1. Координаты предлагаемых для дополнительного введения в структуру транспортной сети ОТУ  $a_{2,1}(t_1) \in A_2$  и  $a_{2,1}(t_2) \in A_2$

Из рисунка 1 выделим проекции на оси координат полученные координаты ОТУ  $a_{2,1}(t_1) \in A_2$  и  $a_{2,1}(t_2) \in A_2$ , образующие прямоугольный треугольник  $\Delta ABC$  (рисунок 2) с гипотенузой в виде вектора  $\vec{a}$ , а также катетами:  $\Delta x = 2,5$  км и  $\Delta y = 6,3$  км.

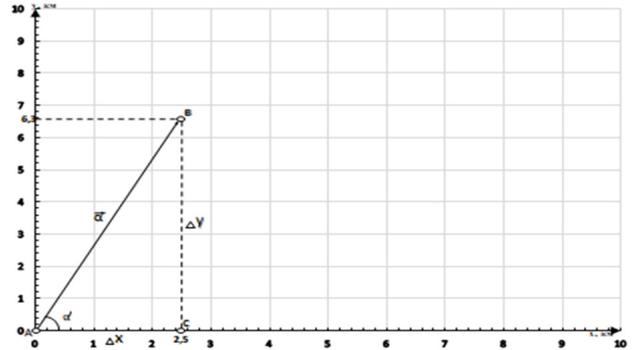


Рис. 2. Проекции полученных координат ОТУ  $a_{2,1}(t_1) \in A_2$  и  $a_{2,1}(t_2) \in A_2$ , образующие прямоугольный треугольник  $\Delta ABC$

Используя теорему Пифагора, произведем вычисление расстояния между ОТУ  $a_{2,1}(t_1) \in A_2$  и  $a_{2,1}(t_2) \in A_2$ :

$$a = |\vec{a}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{2,5^2 + 6,3^2} \approx 6,8 \text{ км,}$$

которое в соответствующей методике будет определять длину расхода ВОК при переходе центрального ОТУ из одного состояния в другое в процессе реконфигурации структуры ОТС.

### Заключение

На основе применения принципа аналогии с позиции использования в транспортной логистике ФПМ произведена разработка соответствующей математической модели для реконфигурации узловой основы ОТС.

Разработанные математические модели (3) и (4) предлагается использовать для разработки методик и алгоритмов формирования отказоустойчивой топологической структуры ОТС специального назначения, что позволит из-за низкой вычислительной сложности решаемой задачи сократить время на принятие решения по реконфигурации сети и обеспечить реализацию требований к структурной отказоустойчивости за счет повышения коэффициента связности от двух до трех независимых путей передачи высокоскоростных ИП в световом диапазоне ОВ и (или) ДВ в ВОК применительно к каждому из ОТН.

## Литература

1. Гавлиевский, С.Л. Принципы построения мультисервисной сети ПАО «Ростелеком» / С.Л. Гавлиевский, В.Г. Карташевский, Д.В. Проскура и др. – М.: Горячая линия – Телеком, 2021. – 228 с.
2. Олифер, В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Олифер, Н.Олифер. – СПб.: Питер, 2024. – 1008 с.
3. Ясинский С. А. Сравнительный анализ базовых типовых структур для построения кабельных локальных вычислительных, телекоммуникационных сетей и сетей доступа // НТЖ «Информация и Космос». СПб.: ООО «Типографский комплекс «Девиз», 2020. №4. – С. 32–38.
4. Ермаков, А.В. Использование технологии «тройная звезда» для модернизации телекоммуникационной системы высокотехнологичной компании / А.В. Ермаков // НТЖ «Информация и Космос», – СПб.: ООО «Типографский комплекс «Девиз», 2024. №4. – С.43–47.
5. Ермаков, А.В. Эволюция концепции W+W для развития телекоммуникационной системы при переходе к цифровой экономике / А.В. Ермаков, К.Ю. Коломенский, Н.А. Соколов // Электросвязь, 2022. – №2. – С. 42–46.
6. Ясинский С. А. Моделирование радиально-двухкольцевой типовой структуры транспортной сети методом стягивания узлов связи / С.А. Ясинский // НТЖ «Телекоммуникации и транспорт». М.: ООО «ИД Медиа Паблишер», 2023. №4. Том 17. С. 42–47.
7. Ясинский С. А. Моделирование радиально-многокольцевой типовой структуры транспортной сети методом стягивания узлов связи / С.А. Ясинский, П.Г. Романенко, А.Н. Зюзин // НТЖ «Научные технологии в космических исследованиях Земли», – М.: ООО «Издательский дом Медиа Паблишер», 2023. – №5. – Том 15. – С. 11–17.
8. Прасолов, В.В. Задачи по планиметрии / В.В. Прасолов. – М.: МЦНМО, 2022. – 640 с.
9. Гаджинский, А.М. Проектирование товаропроводящих систем на основе логистики (5-е издание) / А. М. Гаджинский. – М.: Дашков и К, 2024. – 322 с. [Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROФобразование: <https://profspo.ru/books/144196>]. Дата обращения: 29.12.2024.
10. Баланов, А.Н. Транспорт и логистика. Автоматизация и оптимизация процессов / А.Н. Баланов. – СПб.: Лань, 2024. – 404 с.
11. Ясинский С. А. Сравнительный анализ базовых типовых структур для построения кабельных локальных вычислительных, телекоммуникационных сетей и сетей доступа // НТЖ «Информация и Космос». СПб.: ООО «Типографский комплекс «Девиз», 2020. №4. С. 32–38.
12. Ясинский, С.А. Графический метод определения области допустимой эффективности радиально-кольцевой типовой структуры / С.А. Ясинский, А. Н. Зюзин // Электросвязь, 2022. – №7. – С. 62–66.
13. Ермаков, А.В. Принципы развития телекоммуникационной системы, предназначенной для высокотехнологичной компании / А.В. Ермаков, Н.А. Соколов // НТЖ «Информация и Космос». СПб.: ООО «Типографский комплекс «Девиз». 2020. №1. – С. 6–11.
14. Ясинский, С.А. Обоснование выбора топологической структуры волоконно-оптической сети связи общего пользования / С.А. Ясинский, А. Н. Зюзин // Электросвязь, 2021. – №3. – С. 43–47.

## PHYSICO-PLANIMETRIC METHOD OF FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE OPTICAL TRANSPORT NETWORK OF SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF DEVELOPMENT

Usatsky V.A.<sup>1</sup>, Seleznev A.V.<sup>2</sup>, Volkov V.A.<sup>3</sup>

**Keywords:** radial-ring structure, ring structure, optimization, fiber-optic cable.

### Abstract

*The purpose of the work is to formulate proposals for the practical feasibility of the physico-planimetric method for determining the center of gravity for calculating the optimal coordinate of the location of the central optical transport communication center within the radial-ring structure of the optical network, taking into account the dynamics of development, based on the analysis of the basic typical structures of a special-purpose optical transport network.*

<sup>1</sup>Vladimir A. Usatsky, Lecturer at the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail:usvovan@yandex.ru

<sup>2</sup>Andrey V. Seleznev, Researcher, Research Department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail:andrrel@mail.ru

<sup>3</sup>Vladislav A. Volkov, adjunct of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail:volkovvladik@mail.ru

**Research method:**

1. The physico-planimetric method of determining the center of gravity, which has proven itself in transport logistics.
2. The physico-planimetric method for determining the center of gravity is proposed to be used by analogy to determine the optimal location of the central transport hub of the optical transport network of the radial-ring structure.

**Results of the study:** as a result of the analysis of the basic typical structures and substantiation of the conditions for the physical feasibility of a special-purpose optical transport network by analogy with the physico-planimetric method of determining the center of gravity for the masses of bodies on the plane, an approach is proposed to the introduction of a central additional transport hub within the radial-ring structure of the optical transport network, taking into account the minimization of the consumption of the used fiber-optic cable.

On the basis of the proposed approach, the corresponding mathematical model is clarified, taking into account the dynamics of the movement of transport hubs, that is, the dynamics of the development of the communication network.

**Practical value:** the scientific results obtained make it possible to make calculations for the construction of optimal, from the point of view of minimizing the consumption of the fiber-optic cable used, structures of special-purpose optical transport networks of the radial-ring type. At the same time, the requirements for structural fault tolerance and minimization of time for solving individual optimization problems of planning and organizing fiber-optic communication taking into account changes in the communication situation are ensured.

**References**

1. Gavlievsky, S.L. Principles of building a multiservice network of PJSC Rostelecom / S.L. Gavlievsky, V.G. Kartashevsky, D.V. Proskura et al. – M.: Hotline – Telecom, 2021. – 228 p.
2. Olifer, V. Computer networks. Principles, technologies, protocols / V. Olifer, N.Olifer. – St. Petersburg: Peter, 2024. – 1008 p.
3. Yasinsky S. A. Comparative analysis of basic standard structures for building cable local area computing, telecommunications and access networks // NTZ "Information and Space", St. Petersburg: OOO "Typographic complex "Motto", 2020. – №4. – pp. 32-38.
4. Ermakov, A.V. The use of technology "triple star" for the modernization of the telecommunications system of a high-tech company / A.V. Ermakov // NTZ "Information and Space", St. Petersburg: LLC "Printing complex "Motto", 2024. – No. 4. – pp.43-47.
5. Ermakov, A.V. The evolution of the W+W concept for the development of a telecommunications system during the transition to the digital economy / A.V. Ermakov, K.Y. Kolomenskiy, N.A. Sokolov // Telecommunications, 2022. – No. 2. – pp. 42-46.
6. Yasinsky S. A. Modeling of a radial-two-ring typical structure of transport networks by the method of tightening communication nodes / S.A. Yasinsky // NTZ "Telecommunications and Transport", Moscow: ID Media Publisher LLC, 2023. – No. 4. – Volume 17. – pp. 42-47.
7. Yasinsky S. A. Modeling of a radial-multi-ring typical structure of a transport network by the method of tightening communication nodes / S.A. Yasinsky, P.G. Romanenko, A. N. Zyuzin // NTZ "High-tech technologies in space exploration of the Earth", Moscow: OOO "Publishing House Media Publisher", 2023. – No. 5. – Volume 15. – pp. 11-17.
8. Prasolov, V.V. Problems of planimetry / V.V. Prasolov, Moscow: ICNMO, 2022, – 640 p.
9. Gadzhinsky, A.M. Designing commodity distribution systems based on logistics (5th edition) / A.M. Gadzhinsky. Moscow: Dashkov and K, 2024. – 322 p. [Electronic resource of the digital educational environment of vocational education: <https://profspo.ru/books/144196>]. Date of reference: 12/29/2024.
10. Balanov, A.N. Transport and logistics. Automation and optimization of processes / A.N. Balanov. St. Petersburg: Lan Publ., 2024, 404 p.
11. Yasinsky S. A. Comparative analysis of basic standard structures for building cable local area computing, telecommunications and access networks // NTZ "Information and Space", St. Petersburg: OOO "Typographic complex "Motto", 2020. – №4. – pp. 32-38.
12. Yasinsky, S.A. Graphical method Definitions of the area of permissible efficiency of a radial-ring typical structure / S.A. Yasinsky, A. N. Zyuzin // Telecommunications, 2022. – No. 7. – pp. 62-66.
13. Ermakov, A.V. Principles of development of a telecommunication system designed for a high-tech company / A.V. Ermakov, N.A. Sokolov // NTZ "Information and Space", St. Petersburg: OOO "Typographic complex "Motto", 2020. – No. 1. – pp. 6-11.
14. Yasinsky, S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin, Substantiation of the choice of the topological structure of a fiber-optic communication network for general use, Telecommunications, 2021, No. 3, – pp. 43-47.



# МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Манилюк Е.П.<sup>1</sup>, Гречишников Е.В.<sup>2</sup>, Гречишникова Т.А.<sup>3</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-25-30

**Ключевые слова:** восстановление, разведзащищенность, моделирование, разведка, поражение

## Аннотация

**Цель работы:** повышение достоверности моделирования процессов поражения Вооружения и военной техники противником.

**Результаты** исследования: цель достигнута путем имитации процессов передачи информации, перемещения элементов системы связи, вскрытия и огневого воздействия противника на элементы системы связи с учетом различных средств ведения разведки, типов применяемых средств поражения противником и розыгрыша степеней боевых повреждений.

**Научная новизна** заключается в том, что разработанная модель, в отличие от известных, учитывает процессы вскрытия, динамику перемещения и топологию размещения элементов системы связи, что позволяет повысить достоверность и оперативность оценки обеспеченности и боевой готовности частей (формирований) связи. Теоретическая значимость первого научного результата состоит в дальнейшем развитии и совершенствовании имитационных моделей, решающих задачи повышения достоверности и оперативности оценки технического обеспечения связи и АСУ.

## Введение

Основными особенностями современных операций, влияющими на эффективность восстановления вооружения и военной техники, являются:

- ✓ сокращение расстояний между противоборствующими сторонами и скоротечность операции;
- ✓ повышенный расход боеприпасов противником;
- ✓ увеличение точности наведения и поражения вследствие применения противником современных средств разведки.

Предложенный метод моделирования обеспечивает возможность оценки обеспеченности и уровня боевой готовности частей (формирований) связи в условиях реального времени, а также осуществления в рамках программной реализации поддержки принятия решения должностными лицами органов технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) на восстановление повреждений вооружения и военной техники.

## Постановка задачи

Процесс моделирования в основном вклю-

чает уяснение целей исследования, места и роли модели в процессе исследования, формирование и конкретизацию цели моделирования, постановку задачи на разработку модели; создание модели, включающее содержательное описание моделируемого объекта с позиций системного подхода на вербальном и концептуальном уровнях, разработку имитационной модели; исследование модели, заключающееся в планировании и проведении экспериментов; анализ и обработку результатов моделирования, выработку предложений и рекомендаций [9, 10, 11, 14, 17].

Задача моделирования вскрытия и поражения вооружения и военной техники включает в себя следующие этапы:

- ✓ выбор и обоснование основных показателей разведзащищенности и живучести вооружения и военной техники в условиях разведывательного и огневого воздействия противника;
- ✓ содержательное описание модели оценки потерь вооружения и военной техники в современных операциях;
- ✓ разработка имитационной модели вскрытия и поражения вооружения и военной техники.

При выборе и обосновании показателей разведзащищенности и живучести Вооружения и

<sup>1</sup>Манилюк Евгения Петровна, адъюнкт Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: manilyusha@mail.ru

<sup>2</sup>Гречишников Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, директор по научно-техническому развитию АО НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: e.v.grechishnikov@rubin-spb.ru

<sup>3</sup>Гречишникова Татьяна Анатольевна, научный сотрудник научно-исследовательского центра Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: e.v.grechishnikov@rubin-spb.ru

военной техники в условиях разведывательного и огневого воздействия противника необходимо руководствоваться требованиями основных документов [7, 12, 13].

### Содержательное описание модели

Содержательное описание модели оценки потерь вооружения и военной техники в современных операциях целесообразно выполнить с учетом особенностей ведения современных операций.

При содержательном описании модели необходимо:

- ✓ выбрать структуру системы связи, как объекта разведки и поражения противником;
- ✓ разработать структуру обобщенной модели вскрытия и поражения вооружения и военной техники связи противником;
- ✓ разработать моделирующие алгоритмы (имитации вскрытия вооружения и военной техники и деструктивных воздействий на них, имитации перемещения вооружения и военной техники, а также имитации боевых повреждений, полученных в результате воздействия противником).

В процессе разработки моделирующего алгоритма имитации воздействий необходимо выбрать основные и проранжировать их по степени влияния на разведзащищенность и живучесть вооружения и военной техники.

В процессе разработки моделирующего алгоритма имитации перемещения вооружения и военной техники необходимо учесть эффективность ведения разведки и поражения противником, а также время функционирования вооружения и военной техники на одном положении.

Разработка имитационной модели оценки потерь вооружения и военной техники в современных операциях должна содержать следующие этапы:

- ✓ выбор и обоснование математического аппарата для построения модели;
- ✓ представление системы связи в виде сети массового обслуживания (СеМО);
- ✓ разработка моделирующего алгоритма системы связи, как объектов вскрытия и поражения противником;
- ✓ программная реализация модели;
- ✓ оценка качества разработанной модели.

Система связи в виде СеМО должна быть представлена графом с описанием структуры в форме матриц связности и маршрутизации.

### Математическая модель оценки потерь вооружения и военной техники в современных операциях

Основными исходными данными являются:

- ✓ количество элементов системы связи;
- ✓ закон распределения, значения математического ожидания и дисперсии расстояния до линии соприкосновения с противником;
- ✓ закон распределения, значения математических ожиданий и дисперсий расстояния между элементами системы связи;
- ✓ категории важности элементов системы связи;
- ✓ закон распределения, значения математических ожиданий и дисперсий времени функционирования элемента системы связи на одном положении;
- ✓ значения математических ожиданий, дисперсий, законов распределения, описывающих вскрытие и поражение элементов системы связи для каждого вида разведки и типа средств поражения противника;
- ✓ ошибки, характеризующие эффективность вскрытия противником элементов системы связи для каждого вида разведки;
- ✓ количество видов средств разведки противника (оптическая, оптико-электронная, радиоэлектронная разведка);
- ✓ вероятности вскрытия противником в зависимости от вида разведки, применяемой противником;
- ✓ количество элементов системы связи, поражаемых при одном ударе;
- ✓ количество типов средств поражения противника по типу вооружения (артиллерия, зенитно-ракетные комплексы, БПЛА (беспилотный летательный аппарат), авиация);
- ✓ дальность поражения для каждого типа средств поражения противника;
- ✓ значения математических ожиданий, дисперсий, законов распределения, описывающих время ведения технической разведки;
- ✓ значения математических ожиданий, дисперсий, законов распределения, описывающих время эвакуации поврежденной техники;
- ✓ степень защищенности элементов системы связи от поражения противником (открыто расположенные на местности, закрытый, полузакрытый капонир, габион, в городских условиях (подвалах, в квартирах многоэтажных домов)).

Допущениями являются:

- ✓ моделирование воздействий на элементы си-

- стемы связи осуществляется мгновенно (время воздействия противником на элемент системы связи минимально);
- ✓ в модели рассматриваются современные средства разведки и поражения, имеющиеся у противника в настоящее время;
  - ✓ на один элемент системы связи оказывает воздействие один вид средств разведки и один тип средств поражения противника;
  - ✓ в один момент времени могут поражаться несколько элементов системы связи одного подразделения;
  - ✓ противником могут не выдерживаться нормативы расхода боеприпасов;
  - ✓ имитационное моделирование поражения элементов системы связи уточняется с учетом следующих сценариев:
    - a) противник верно вскрыл элемент системы связи, но неправильно поразил установленную цель;
    - b) противник верно вскрыл элемент системы связи, но не успел его поразить;
    - c) противник верно вскрыл элемент системы связи, но не поразил его из-за отсутствия боеприпасов;
    - d) одновременно может имитироваться перемещение от 20% до 60% всех элементов на каждом пункте управления.
- Ограничения:
- ✓ система связи рассматривается как совокупность двухполюсных последовательно-параллельных систем;
  - ✓ выбор моделирующей системы связи осуществляется из вариантов построения системы связи на пунктах управления;
  - ✓ связь, как процесс передачи информации, не имитируется, моделируется только структура системы связи;
  - ✓ вид боевых действий учитывается при выборе системы связи;
  - ✓ противник применяет высокоточное оружие;
  - ✓ средства разведки противника:
    - 1) оптическая разведка;
    - 2) оптико-электронная разведка;
    - 3) радиоэлектронная разведка;
  - ✓ в модели имитируются последствия применения противником различных типов средств воздействия, факт непосредственно разрушения не имитируется;
  - ✓ в качестве последствий применения противником средств воздействия имитируются степени поражения элементов системы связи (слабые, средние, сильные, безвозвратные потери).
- Основными выходными результатами являются [4, 14, 19] количество пораженных элементов системы связи, степени поражения элементов системы связи, развертывающих элементы системы связи на пунктах управления.

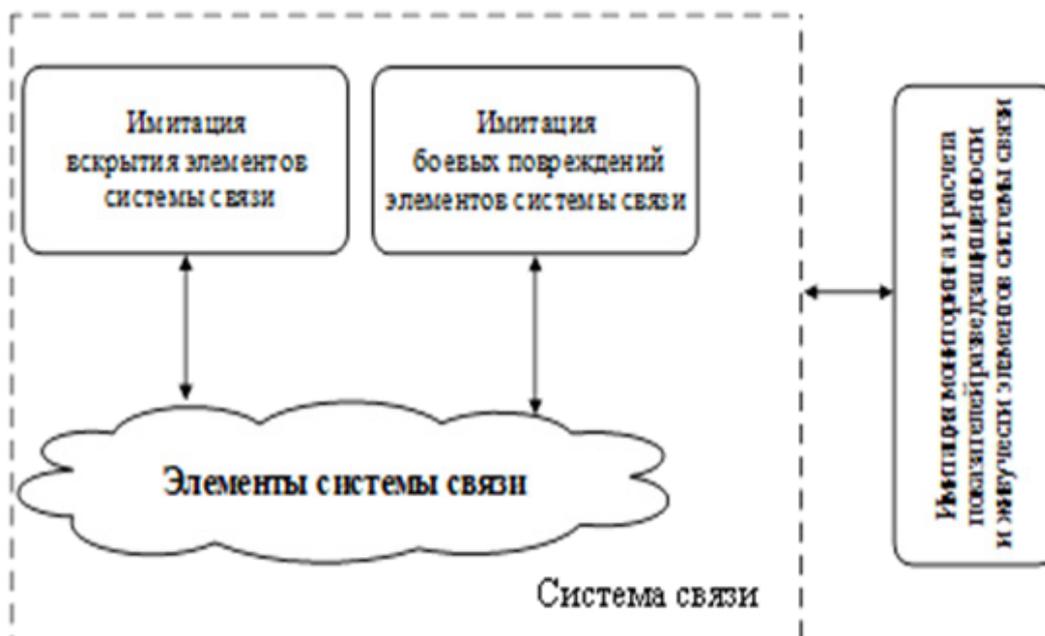


Рис. 1. Обобщенная модель поражения вооружения и военной техники частей связи в современных операциях

**Заключение**

Рассмотренная в статье модель оценки потерь вооружения и военной техники частей связи в современных операциях позволит решить задачу по реализации заданной обеспеченности частей связи вооружением и военной техникой, которая определяет степени боевой готовности

частей (соединений) связи и их подразделений, что в свою очередь влияет на систему управления войсками и оружием.

С ее помощью может быть решена задача повышения достоверности определения технического состояния поврежденной техники для обеспечения рациональности использования средств и сил ремонта и эвакуации.

**Литература**

1. Манилюк Е.П., Гречишников Е.В., Гиляdziнов М.С. Моделирование отказов и восстановлений средств связи// Промышленные АСУ и контроллеры. 2023. № 6. С.24-27.
2. Манилюк Е.П., Гиляdziнов М.С., Федяев Ю.Ю., Гречишникова Т.А. Моделирование надежности сети передачи данных специального назначения. Телекоммуникационные технологии. 2023. Вып. 33. С. 141-149. Инв. В-6931.
3. 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
4. Теоретические основы организации связи в объединениях / Под общ. ред. Иванова В. И. – СПб.: ВАС, 1991. – 687 с.
5. Ермишян А. Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях учебник. Часть 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи. / А. Г. Ермишян. – СПб.: ВАС, 2005 – 740 с.
6. Юрлов Ю. Е. Расчет живучести сложных технических систем. Методика. К 3626. – Л.: 1986.
7. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи: учеб. пособие для вузов / И. Р. Берганов, В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.
8. Альянах И. Н. Моделирование вычислительных систем. – Л.: Машиностроение, 1988. – 223 с.
9. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.
10. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. 4-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2005 343 с.
11. Иванов Е. В. Имитационное моделирование средств и комплексов связи и автоматизации. – СПб.: ВАС, 1992. – 206 с.
12. Методика выбора показателей для оценки надежности сложных технических систем. – М.: Издательство стандартов, 1977. – 44 с.
13. Зеленцов В. А., Гагин А. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи МО. – СПб.: ВАС, 1991. – 169 с.
14. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
15. Иващенко А. В., Сыпченко Р. П. Основы моделирования сложных систем на ЭВМ. – Л.: ЛВВИУС, 1988. – 272 с.
16. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.
17. Моделирование систем. Практикум: учеб. пособие для вузов/ Советов Б. Я., Яковлев С. А. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2003. – 295 с.: ил.
18. Шаракшанэ А. С., Шахин В. П., Халецкий А. К., Испытания программ сложных автоматизированных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 191 с.
19. Ломовицкий В. В., Щекотихин В. М. Основы построения систем и сетей передачи информации – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 382 с.
20. Белов А. С., Гречишников Е. В., Иванов В. А. и др. Способ моделирования процессов обеспечения технической готовности сетей связи при технической эксплуатации и система для его реализации. Патент на изобретение № 2336566 от 20.10.2008.
21. Патент на изобретение «Устройство для моделирования отказов в сложных системах». Авт. св. СССР № 1108457, G 06 F 15/20, 1984.
22. Белов А. С., Гречишников Е. В., Иванов В. А. и др. Способ моделирования отказов и повреждений сетей связи. Патент на изобретение № 2351012 от 27.03.2009.
23. Белов А. С., Гречишников Е. В., Загородников М. А. Программа для моделирования диагностирования элементов ССС. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №742. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ и баз данных Академии ФСО России 18.04.2008.

# A MODEL FOR ESTIMATING LOSSES OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Maniluk E.P.<sup>1</sup>, Grechishnikov E.V.<sup>2</sup>, Grechishnikova T.A.<sup>3</sup>

**Keywords:** recovery, intelligence protection, simulation, exploration, defeat.

## Abstract

**The purpose** of the work: increasing the reliability of modeling the processes of destruction of Weapons and military equipment by the enemy.

**The results:** the purpose is achieved by simulating the processes of transmitting information, moving elements of the communication system, opening and firing the enemy on the elements of the communication system, taking into account the various means of reconnaissance, the types of weapons used by the enemy and the degrees of combat damage.

**Novelty:** The problem lies in the fact that the developed model, unlike the known ones, takes into account the opening processes, the dynamics of movement and the topology of the placement of elements of the communication system, which makes it possible to increase the reliability and efficiency of assessing the security and combat readiness of communication units (formations). The theoretical significance of the first scientific result lies in the further development and improvement of simulation models that solve the tasks of increasing the reliability and efficiency of evaluating the technical support of communications and automated control systems.

## References

1. Maniliuk E.P., Grechishnikov E.V., Giladzinov M.S. Modeling of failures and recoveries of communication facilities// Industrial automated control systems and controllers. 2023. No. 6. pp.24-27.
2. Maniliuk E.P., Giladzinov M.S., Fedyaev Yu.Y., Grechishnikova T.A. Modeling the reliability of a special-purpose data transmission network. Tele-communication technologies. 2023. Issue 33. pp. 141-149. Inv. V-6931.
3. Maniliuk E.P., Grechishnikov E.V., Fedyaev Yu.Y. A way to ensure timely communication restoration. The current state and prospects for the development of special-purpose infocommunication networks. Materials of the scientific and practical conference. Saint Petersburg, 2024. pp.178-180
4. Theoretical foundations of the organization of communication in associations / Under the general editorship. Ivanova V. I. – St. Petersburg: VAS, 1991. – 687 p.
5. Ermishyan A. G. Theoretical foundations of building military communications systems in formations and formations textbook. Part 1. Methodological foundations of the organizational and technical systems of military communications. / A. G. Ermishyan. – St. Petersburg: VAS, 2005 – 740 p.
6. Yurlov Yu. E. Calculation of survivability of complex technical systems. The methodology. K 3626. – L.: 1986.
7. Design and technical operation of transmission systems: textbook. software for universities / I. R. Berganov, V. N. Gordienko, V. V. Krukhmalev. – M.: Radio and Communications, 1989. – 272 p.
8. Alyanakh I. N. Modeling of computer systems. – L.: Mashino-stroenie, 1988. – 223 p.
9. Maksimov I. V. Simulation modeling on a computer. Moscow: Radio and Communications, 1988. 232 p.
10. System modeling: textbook. for universities / B. Ya. Soviets, S. A. Yakovlev. – 4th ed., ster. – M.: Higher School, 2005. – 343 p.
11. Ivanov E. V. Simulation modeling of communication and automation facilities and complexes. – St. Petersburg: VAS, 1992. – 206 p.
12. Methodology for selecting indicators for assessing the reliability of complex technical systems. Moscow: Publishing House of Standards, 1977. 44 p.
13. Zelentsov V. A., Gagin A. A. Reliability, survivability and maintenance of MO communication networks. St. Petersburg: VAS Publ., 1991– 169 p.
14. Buslenko N. P. Modeling of complex systems, Moscow: Nauka Publ., 1978, 399 p.
15. Ivashchenko A.V., Sypchenko R. P. Fundamentals of modeling complex systems on a computer. – L.: LVVIUS, 1988. -272 p.
16. Boev V. D. Modeling of systems. GPSS World Tools: textbook. stipend. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2004. – 368 p.

<sup>1</sup>Evgeniya P. Maniluk, Adjunct of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: manilyusha@mail.ru

<sup>2</sup>Evgeny V. Grechishnikov, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Director for Scientific and Technical Development of JSC Research Institute "Rubin", St. Petersburg, Russia. E-mail: e.v.grechishnikov@rubin-spb.ru

<sup>3</sup>Tatyana A. Grechishnikova, Researcher, Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: e.v.grechishnikov@rubin-spb.ru

17. Modeling of systems. Practicum: study. handbook for universities/ Soviets B. Ya., Yakovlev S. A. – 2nd ed. – M.: Higher School, 2003. – 295 p.: ill.
18. Sharakshane A. S., Shakhin V. P., Khaletsky A. K., Testing programs of complex automated systems. – M.: Higher School, 1982. – 191 p.
19. Lomovitsky V. V., Shchekotikhin V. M. Fundamentals of building information transmission systems and networks, Moscow: Hotline-Telecom, 2005– 382 p.
20. Belov A. S., Grechishnikov E. V., Ivanov V. A. and others. A method for modeling the processes of ensuring the technical readiness of communication networks during technical operation and a system for its implementation. Patent for invention No. 2336566 dated 10/20/2008.
21. Patent for the invention "Device for modeling failures in complex systems". Author of the USSR No. 1108457, G 06 F 15/20, 1984.
22. Belov A. S., Grechishnikov E. V., Ivanov V. A. and others. A method for modeling failures and damages of communication networks. Patent for invention No. 2351012 dated 03/27/2009.
23. Belov A. S., Grechishnikov E. V., Zagorodnikov M. A. A program for modeling the diagnosis of CCC elements. Certificate of official registration of computer programs No. 742. It was registered in the Register of Computer programs and databases of the Academy of the Federal Tax Service of Russia on 18.04.2008.



# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВ СВЯЗИ СУХОПУТНЫХ ВОЙСК США

Лукьянчик В.Н.<sup>1</sup>, Сорокин К.Н.<sup>2</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-31-39

**Ключевые слова:** перспективные разработки, конвергентные технологии, направления деятельности, программы развития, тактический интернет, объединенное управление, концептуальный подход, конвергенция.

## Аннотация

**Цель:** анализ направления развития системы и средств связи Сухопутных войск США.

**Метод:** аналитический обзор.

**Результатом** проведенного аналитического исследования является получение представления о тенденциях совершенствования системы связи и управления Сухопутных войск США. Тенденция развития предполагает переход от разрозненных технологий и решений к конвергентным технологиям. Значительное внимание уделено концепции JADC2, ориентированной на создание отдельных систем управления различного назначения на основе искусственного интеллекта.

Приведено описание «Тактического интернета», основанного на применении имеющегося задела ранее проводимых программ развертывания сетей связи различного назначения. Описаны фрагменты системы WIN-T.

Также указано на преимущества, получаемые при реализации программы развития системы связи и управления, а также этапность ее реализации. Данные результаты указывают на активное внедрение перспективных технологий, в том числе элементов искусственного интеллекта, с учетом имеющегося на настоящий момент технологического задела.

Описание текущих и приостановленных разработок систем связи и управления позволяют судить об общих направлениях развития и принятых ранее ошибочных решениях, полученных результатах реализации программ развития и перспективах их дальнейшей реализации.

**Практическая ценность:** материалы статьи могут быть использованы при формировании программ развития системы связи ВС РФ как с точки зрения технической реализации отдельных элементов системы связи, так и с точки зрения интенсификации развития отдельных технологий связи, предоставляющих определенные преимущества в части развертывания единого информационного пространства в интересах Вооруженных сил Российской Федерации

## Введение

Вооруженные силы США продолжают совершенствовать как обычные средства поражения, так и разрабатывать перспективные комплексы на основе прорывных технологий. Основой выбора прорывных технологий является степень их соответствия военным требованиям. Для достижения глобального превосходства ВС США в войнах будущего и обеспечения технологического преимущества МО США принято ряд стратегий и концепций модернизации вооруженных сил на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Для управления предусматривается использование множества сетей связи с целью ускорения принятия решений в рамках единой системы принятия решений и передачи данных. Кроме того, предусматривается разработка си-

стемы, которая смогла бы объединить средства обнаружения и целеуказания всех видов и родов ВС США в единую сеть, с использованием искусственного интеллекта для анализа поступающей информации, что в перспективе позволит всем формированиям ВС США напрямую обмениваться данными, а это в свою очередь сократит задержки в принятии решений.

Наметилась тенденция перехода от отдельных «разрозненных» технологий к конвергентным технологиям, сочетающих в себя ряд перспективных технологий, таких как инфотелекоммуникационные технологии (искусственного интеллекта, квантовые и фотонные технологии и другие). Согласно концепции «Объединенное управление во всех сферах» — JADC2 предполагается реализация ряда проектов по созданию отдельных систем управления различного назначения на ос-

<sup>1</sup>Лукьянчик Валентин Николаевич, кандидат военных наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vas-nic@yandex.ru

<sup>2</sup>Сорокин Константин Николаевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела научно-исследовательского центра Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vas-nic@yandex.ru

нове искусственного интеллекта для сухопутных войск (Project Convergence), военно-воздушных сил (Advanced Battle Management System, ABMS) и военно-морских сил (Overmatch). [1]

**Направления совершенствования систем и средств связи Сухопутных войск США различного назначения**

Взятый курс США на создание перспективных средств, комплексов вооружения и средств связи направлен в настоящее время на их ускоренную поставку прежде всего на Украину, чтобы обеспечить некоторые преимущества в вооруженном конфликте и заменить устаревшие образцы техники. Приведенные концептуальные положения на перспективу уже по отдельным позициям реализуются на основе прорывных технологий.

Предполагается, что в результате реализации JADC2 будет сформирована объединенная межвидовая облачная среда обработки и передачи данных с использованием множества сетей связи с целью ускорения принятия решений в рамках единой системы принятия решений и передачи данных. Кроме того, концепция предусматривает разработку системы, которая смогла бы объединить средства обнаружения и целеуказания всех видов и родов ВС США в единую сеть, с использованием искусственного интеллекта для анализа поступающей информации, что в перспективе позволит всем формированиям ВС США напрямую обмениваться данными. [2]

В основу реализации концепции положены следующие принципы:

- разработка стандарта универсального и непрерывного обмена информацией на уровне корпоративной информационной системы;
- обеспечение безопасности управления объединенными силами с помощью «многоуровневой» и «эффективной киберзащиты»;
- наличие совместимой и стандартизированной структуры данных;
- обеспечение оперативности и устойчивости в условиях ухудшенной обстановки;
- унификация процессов разработки и внедрения средств с целью повышения эффективности межсферных возможностей.

В рамках JADC2 обозначены пять направлений деятельности с использованием инновационных технологий:

- создание комплекса данных JADC2 (Establish the JADC2 Data Enterprise), направленное на разработку сигнально-кодовых конструкций, создание критериев маркировки метаданных, принятие стандартизированного интерфейса

данных, методов обеспечения безопасности и создание специфических ИТ-стандартов JADC2, которые повысят способность командиров пользоваться и управлять данными;

- реализация организационно-штатных изменений в направлении сосредоточения особого внимания человеческой производительности в области управления с учетом растущего объема поступающих данных и информации и необходимостью их обработки и обобщения;
- создание технической основы JADC2 предполагает повышение общей ситуационной осведомленности, синхронного и асинхронного глобального взаимодействия, стратегического и оперативного объединения планирования, визуализацию и управление глобальными силами в режиме реального времени.
- интеграция управления ядерными силами с JADC2 (Integrate NC2/NC3 with JADC2) предусматривает возможность интеграции автоматизированной системы управления ядерными силами с JADC2.
- модернизация процесса совместного использования информации с участниками выполнения задачи (Modernize Mission Partner Information Sharing) процесса обмена и обработки информации между различными системами управления участников выполнения задачи с целью координации действий.

Планируя развитие системы управления командование СВ США исходит из того, что опыт, полученный при проведении военных операций в Афганистане и Ираке, не является показательным. Причиной этого является то, что в обоих государствах сухопутные войска в основном участвовали в операциях по борьбе с повстанцами и выполняли задачи по обеспечению стабильности, в то время как крупномасштабные боевые операции против сильных противников могут потребовать гораздо более высоких оперативных темпов и привести к большим потерям.

В качестве основных факторов, оказывающих существенное влияние на применение систем управления и связи в будущем, выделяются следующие:

- необходимость участия в операциях, охватывающих несколько операционных сред (воздушная, морская, сухопутная, космическая, кибернетическая, электромагнитный спектр);
- сильная зависимость группировок войск (сил) от гарантированного доступа к электромагнитному спектру;
- наличие существенных угроз от действий киберсил и средств радиоэлектронной борьбы противника.

Основу современной системы связи, обеспечивающей организацию взаимодействия элементов автоматизированных систем управления оперативно-тактического звена управления СВ США, должна составлять информационно-коммуникационная сеть «Тактический интернет» которая, в свою очередь, является элементом информационной сети сухопутных войск США (DODIN-A, Department of Defense Information Network-Army). Функционально данная сеть аналогична глобальной компьютерной сети «Интернет» и основана на ее технологиях и протоколах. [3] [4]

В организационно-техническом плане информационно-коммуникационная сеть «Тактический интернет» разделена на верхний и нижний уровни.

«Тактический интернет» верхнего уровня обеспечивает взаимодействие пунктов управления от уровня бригады и выше с вышестоящим командованием, совместимость с системами связи других видов вооруженных сил, министерств и ведомств США и союзников.

Его основу составляет оборудование, поставленное сухопутным войскам США в ходе реализации программы «WIN-T», другие средства узлов связи, обеспечивающие для пунктов управления армейских корпусов и выше доступ в информационно-коммуникационную сеть сухопутных войск США с остановок (рис.1), а для пунктов управления бригад и дивизий как с остановок, так и в движении (рис. 2). Состав оборудования является типовым для армий, дивизий, бригад, батальонов и рот.

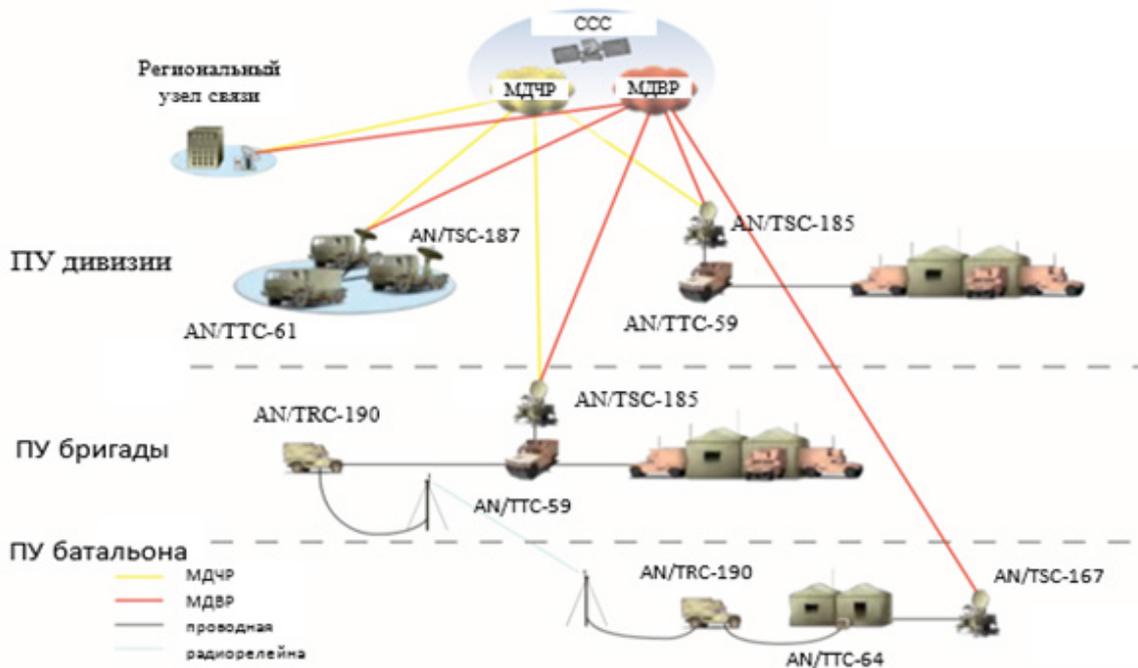


Рис. 1. Фрагмент системы связи «WIN-T», обеспечивающей связь с остановок

Состав оборудования для пунктов управления полевых армий включает:

- региональный узел связи — хаб RHN (Regional Hub Node), оснащенный тремя антеннами спутниковой связи апертурой 3,9 м и позволяющий обеспечивать связь с тремя дивизиями и одной отдельной бригадой сухопутных войск. Узел связи представляет собой стационарное оборудование и используется для обеспечения связью командования на театре военных действий, обладает пропускной способностью до 360 Мбит/с;
- коммутатор AN/TTC-56 SSS (Single Shelter Switch), совместимый со всеми видами терминалов военных и коммерческих систем спутниковой связи, станциями радиорелейной связи и средствами проводной связи;
- тактические терминалы AN/TSC-154 (SMART-T, Secure, Mobile, Anti-Jam, Reliable Tactical Terminal) безопасной, мобильной, защищенной, надежной спутниковой связи «Милстар/Аехф»;
- тактические терминалы широкополосной спутниковой связи AN/TSC-156 (Phoenix).

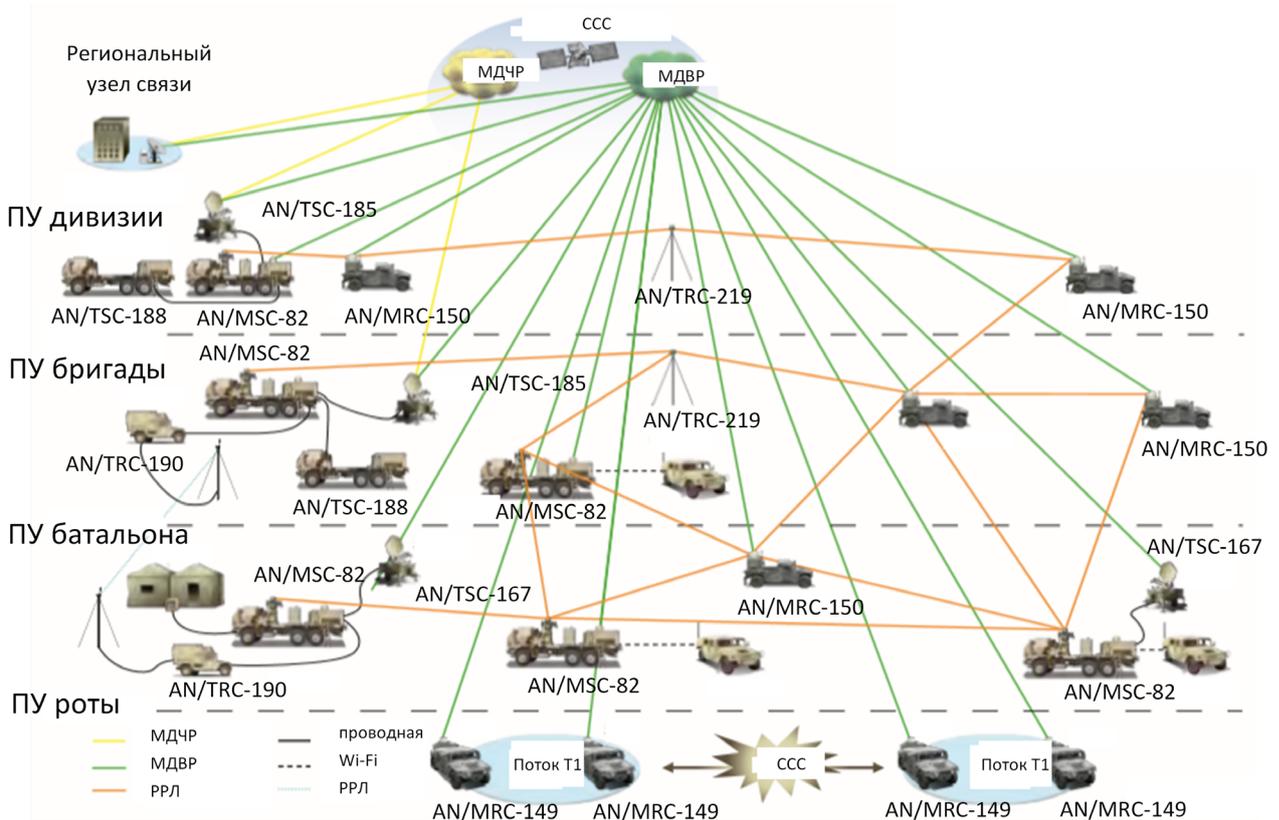


Рис. 2. Фрагмент системы связи «WIN-T», обеспечивающей связь в движении

*Для пунктов управления дивизий:*

- тактический узел связи AN/TTC-61 THN (Tactical Hub Node) с двумя терминалами спутниковой связи AN/TSC-187 пропускной способностью 48 Мбит/с (в режиме МДВР) и 96 Мбит/с (в режиме МДЧР);
- узел связи AN/TTC-59 (JNN, Joint Network Node) с терминалом спутниковой связи AN/TSC-185 (STT(V)1, Satellite Tactical Terminal);
- тактический узел связи AN/MSC-82 (TCN, Tactical Communication Node);
- ретранслятор AN/TRC-219 (TR-T, Tactical Relay-Tower);
- модульный узел связи AN/TSC-190 «Мсн-б» (MCN-B, Modular Communications Node – Basic);
- шлюзовое оборудование AN/TSC-189 (JGN, Joint Gateway Node);
- центр управления связью и безопасностью AN/TSC-188(V)2 (NOSC-D, Network Operations Security Center - Division);
- тактический терминал AN/TSC-154 (SMART-T, Secure, Mobile, Anti-Jam, Reliable Tactical Terminal) безопасной, мобильной, защищенной, надежной спутниковой связи «Милстар/Аехф»;

- станции радиорелейной связи AN/TRC-190(V)3;
- терминал спутниковой связи пункта управления разведкой AN/TSC-226(V)3 TROJAN SPIRIT;
- терминал спутниковой связи пункта управления материально-техническим обеспечением AN/TSC-183.

*Для пунктов управления бригад:*

- узел связи AN/TTC-59 (JNN, Joint Network Node) с терминалом спутниковой связи AN/TSC-185 (STT(V)1, Satellite Tactical Terminal)
- тактический узел связи AN/MSC-82 (TCN, Tactical Communication Node);
- ретранслятор AN/TRC-219 (TR-T, Tactical Relay-Tower);
- модульный узел связи AN/TSC-190 «Мсн-б» (MCN-B, Modular Communications Node – Basic);
- центр управления связью и безопасностью AN/TSC-188(V)1 (NOSC-B, Network Operations Security Center - Brigade);
- командно-штабная машина AN/MRC-150 (PoP, Point-of-Presence);
- станция радиорелейной связи AN/TRC-190(V)3;

- терминал спутниковой связи пункта управления разведкой AN/TSC-190(V)2,3 TROJAN SPIRIT;
- терминал спутниковой связи пункта управления материально-техническим обеспечением AN/TSC-183.

*Для пунктов управления батальонов:*

- узел связи AN/TTC-64 (CPN, Command Post Node) с терминалом спутниковой связи AN/TSC-167 (STT(V)2, Satellite Tactical Terminal);
- станции радиорелейной связи AN/TRC-190(V)1;
- командно-штабная машина AN/MRC-150 (PoP, Point-of-Presence);

*Для пунктов управления рот:*

- командно-штабная машина AN/MRC-149 (SNE, Soldier Network Extension).

«Тактический интернет» нижнего уровня обеспечивает взаимодействие на уровне от пункта управления бригады до взвода. С технической точки зрения сеть развертывается на базе многофункциональной системы (МФС) EPLRS (Enhanced Position Location Reporting System) и терминалов АСУ тактического звена FCB2 (Force XXI Battle Command Brigade and Below). [5–8]

Система EPLRS предназначена для решения задач автоматического сбора и представления в масштабе времени близком к реальному информации о расположении и боевых возможностях своих сил и средств, положении противника, а также для передачи команд и целеуказаний. Она представляет собой сеть передачи данных, функционирующую в диапазоне частот 420–450 МГц.

Система командной радиосвязи представляет собой совокупность разноуровневых систем связи ВЧ-, ОБЧ- и УВЧ-диапазонов, тактической спутниковой связи подразделений и пунктов управления. [9]

Основными средствами боевого управления системы командной радиосвязи являются радиостанции ОБЧ-диапазона семейства «SINCGARS» различных модификаций (AN/VRC-87, -88, -89, -90, -91, -92, AN/PRC-119F), радиостанции ОБЧ-УВЧ-диапазонов семейства «Falcon III» AN/PRC-117G фирмы HARRIS и AN/PRC-148 фирмы THALES.

Основным средством командной радиосвязи ВЧ-диапазона являются радиостанции AN/VRC-104(V)3 семейства «Falcon II» производства фирмы HARRIS.

Средства МФС EPLRS системы «Тактический интернет» включают терминалы AN/VSQ-

2(V)1 (возимые) и AN/VSQ-2(N)4 (станции привязки, сетеобразующие).

Спутниковые средства связи представлены носимыми станциями AN/PSC-5 «SPITFIRE», AN/PSC-11 «SCAMP».

Вопросы планомерной модернизации и перехода от концептуального подхода к практической реализации возложены, в частности, на Управление программ развития тактических систем управления и связи СВ США (PEO C3T, Program Executive Office Command Control Communication - Tactical). Реализация программ включает комплекс проектов по созданию средств и узлов связи и плановое оснащение бригад связи.

На 2023 и 2024 года планировалась поставка средств связи для механизированных подразделений, отвечающих требованиям по производительности, устойчивости и сопрягаемости. Средства за счет расширения спектра радиосигналов и используемых диапазонов рабочих частот должны позволять передавать данные от широкого спектра разведывательных средств, графические и видео данные, обеспечивать устойчивость спутниковых линий связи. Разработка соответствующих технологий и решений ведется с 2020 г. На вооружение планировалась поставка:

- терминалов спутниковой связи для связи с места, использующих ресурсы коммерческих систем спутниковой связи (SATCOM at-the-halt);
- продолжение поставок персональных и портативных средств связи по программе «Интегрированная тактическая связь» (ITN, Integrated Tactical Network);
- разработка модульного открытого набора стандартов для средств связи, разведки и радиоэлектронной борьбы (CMOSS, C4ISR/Electronic Warfare Modular Open Suite Standards) и модульной архитектуры открытых систем (MOSA, Modular Open Systems Architecture), позволяющих достичь сопрягаемости технических средств СВ США;
- поставка в войска зарекомендовавших себя средств связи (таких как радиостанции семейства SINCGARS), модернизированных с точки зрения помехоустойчивости от воздействия средств РЭБ противника;
- обеспечение сопрягаемости приложений, предназначенных для управления, с точки зрения их применимости в многосферных операциях;
- наращивание возможностей по передаче информации в интересах обеспечения расшире-

ния функционирования систем с искусственным интеллектом.

По плану на 2025 и 2026 года сухопутными войсками будет наращиваться применение гражданских технологий и решений для обеспечения автоматической и защищенной связью войск (сил) за счет использования облачных технологий, средств поддержки принятия решений, управления сетями связи, обеспечения безопасности связи, новых сигнально-кодовых конструкций, технологий сотовой связи (5G). Планируется [10]:

- продолжение поставок персональных и портативных средств связи по программе «Интегрированная тактическая связь» (ITN, Integrated Tactical Network);
- модернизация средств тактической связи танковых подразделений, соединений и воинских частей;
- внедрение новых сигнально-кодовых конструкций в радиосвязь и спутниковую связь, позволяющих повысить устойчивость от воздействия средств РЭБ противника, возможность масштабируемости и расширение полосы используемого спектра;
- расширения использования коммерческих систем сотовой связи 5G или их аналогов;
- начало поступления терминалов спутниковых систем связи, использующих ресурсы коммерческих систем на низких и средних орбитах, обеспечивающих связь в движении;
- средств обеспечения киберзащиты;
- поставка новых средств для обеспечения функционирования пунктов управления;
- интеграция существующей системы связи с перспективными средствами.

По плану на 2027 и 2028 года предполагается поставить на вооружение беспроводные системы связи с высокой защитой от воздействия РЭБ и киберсил противника, с возможностью широкого внедрения технологий искусственного интеллекта и машинного обучения в средства поддержки принятия решений и управления сетями связи, повышения разведзащищенности пунктов управления и подразделений от средств радиоэлектронной разведки противника, достижения полной сопрягаемости средств и программного обеспечения подразделений различных родов войск.

К 2028 г. планируется:

- появление сигнально-кодовой конструкцией, обеспечивающих эффективное использование спектра радиочастот, высокую скорость передачи данных, разведзащищенность, по-

мехоустойчивость, защищенность от кибервоздействий;

- использование средств поддержки принятия решений с элементами искусственного интеллекта и машинного обучения;
- использование технологий сотовой связи 5 поколения или ее аналогов;
- совершенствование возможности рассредоточения технических средств пунктов управления на местности;
- обеспечение сопряжения программных продуктов с целью формирования единой тактической обстановки.

Программа создания «Интегрированной инфраструктуры пункта управления» (CPI2, Command Post Integrated Infrastructure) предполагает своей целью создание оборудования пунктов управления, обеспечивающих их мобильность, масштабируемость, живучесть.

В рамках программы «Единые сетевые операции» реализуется продукт «Атом», предназначенный для управления радиостанциями типов: AN/PRC-148, -158, 162, -163, сигнально-кодовыми конструкциями TSM, MUOS, SINGARS, IW/DAMA SATCOM, а также система управления сетевыми операциями (NOMS, Network Operations Management System NOMS), предназначенный для управления секретными, несекретными и коалиционными сетями связи.

В рамках отдельных программ поступают комплексы вооружений, терминалы спутниковой связи «Микро Висат» (Micro-VSAT) представляющие собой универсальные наземные спутниковые терминалы и работающие в Ka- и X-диапазонах.

В рамках программы «Боевые сети связи» (MN, Mission Network) поставляются оборудование тактической связи (TNT, Tactical Network Transport), обеспечивающее доступ сухопутных войск к тактическому интернету высшего уровня. Это оборудование обеспечивает командование возможностями передачи голосовой и видеoinформации, необходимой для достижения успеха в многосферных операциях.

В составе Глобальной интегрированной транспортной сети «GAIT» (Global Agile Integrated Transport) имеется оборудование, соединяющее региональные узлы связи-хабы и телепорты Министерства обороны США, формируя глобальную сеть связи, которая обеспечивает обмен данными с высокой пропускной способностью из любой точки планеты. Кроме того, с развитием архитектуры этой транспортной сети связи подразделения СВ смогут для передачи данных получить возможность использования 150 точек доступа,

которые планируется поставить на вооружение дивизий, армейских корпусов, бригад связи (на ТВД) или других специальных пользователей без необходимости использовать региональные узлы связи-хабы или телепорты МО. Это упростит доступ к транспортным сетям связи и позволит командованию управлять рассредоточенными по всему миру подразделениями с повседневных или полевых пунктов управления. Развитие транспортной сети «GAIT» является одной из важнейших задач плана наращивания возможностей тактических систем связи СВ США до 2028 года

Для обеспечения доступа командования к возможностям транспортных сетей связи, отвечающих современным требованиям по мобильности, помехоустойчивости, разведзащищенности, пропускной способности, применяются перспективные радиорелейные станции «TriLOS» (Terrestrial Line of Site Radio), перспективные станции тропосферной связи, средства обеспечения беспроводной связи на пунктах управления (CWLAN, Secure Wireless Campus Wide Local Area Network), (SWMRE, Secure Wireless Mesh Remote Endpoint);

Проведение совместных многосферных операций напрямую зависит от возможности обмена данными с союзниками. С этой целью сухопутными войсками США рассматривается вопрос применения коммерческого оборудования, способного обеспечивать связью проведение совместных многосферных операций.

Программа «Спутниковой связи» (SC, Satellite Communications) направлена на поддержку средств тактической спутниковой связи. Благодаря разнообразию терминалов, различающихся по размеру и возможностям, глобальная сеть спутниковой связи сухопутных войск обеспечивает совместимую высокоскоростную связь с высокой пропускной способностью на большие расстояния в различных условиях местности, практически в любое время и в любом месте, без необходимости в стационарной инфраструктуре. В сферу деятельности отдела входят тактические многоканальные спутниковые наземные коммерческие многодиапазонные спутниковые терминалы C-, Ku-, Ka-, X- и L-диапазонов. [11]

В рамках программы реализуются следующие проекты:

- разработка организационно-штатной структуры и типового комплекта оборудования на перспективных средствах связи;
- создание многоорбитальной системы спутниковой связи (Multi-Orbit SATCOM), охватывающей спутниковые системы связи на низких, средних орбитах и геостационарные спутниковые системы связи, для обеспечения сухопутных войск высокоскоростной, мобильной,

устойчивой, надежной связью;

- развитие транспортных сетей связи подразделений, материально-технического и медицинского обеспечения (STS, Sustainment Transport System).

Развитие технологий и средств связи в рамках концепции «Объединенное управление во всех сферах» предусматривает разработку системы, которая бы объединяла средства обнаружения и целеуказания всех видов и родов ВС США в единую сеть, с использованием искусственного интеллекта для анализа поступающей информации, что в перспективе позволит всем формированиям ВС США напрямую обмениваться данными, что в свою очередь сократит задержки в принятии решений. В рамках комплекса программ предусматривается модернизация и разработка перспективных средств связи на основе прорывных технологий.

Перспективная система связи, обеспечивающая организацию взаимодействия элементов автоматизированных систем управления оперативно-тактического звена управления СВ США, составит информационно-коммуникационную сеть «Тактический интернет» которая, в свою очередь, является элементом информационной сети сухопутных войск США (DODIN-A, Department of Defense Information Network-Army). Функционально такая сеть аналогична глобальной компьютерной сети «Интернет» и основана на ее технологиях и протоколах.

### Выводы

Исходя из вышеизложенного следует, что развитие систем и средств связи в Сухопутных войсках США направлено на развертывание единого информационного пространства на базе современных технологий и решений, в том числе, используемых в гражданском секторе. При этом широко применяется имеющийся задел, полученный при разработке ранних проектов развертывания сетей связи различного уровня (в том числе WIN-N), как в части применения имеющихся и поставленных на вооружение войск средств и комплексов связи, так и перспективных решений на основе современных технологий

Данная тенденция присуща всем ведущим государствам, что отражает концепцию обеспечения всеобъемлющей осведомленности на поле боя в реальном масштабе времени и сквозную интеграцию систем управления всех уровней за счет развертывания единой транспортной основы информационной системы и широкого применения облачных технологий и элементов искусственного интеллекта в системах поддержки принятия решений и обработки больших данных.

### Литература

1. Summary Of The Joint All-Domain Command & Control (JADC2) Strategy. Department Of Defense USA, 2022.
2. Жаров М.. Создание автоматизированной системы боевого управления вооруженными силами США // Зарубежное военное обозрение. 2023. № 11. С. 9–15.
3. Масалимов А. В., Акимов А. В., Удалова А. П. Обзор систем связи тактического звена управления вооруженных сил США. Военная мысль, 2023, № 8, С. 146–157.
4. Ненадович Д. М., Надточий Я. А., Калинин С. В.. Анализ основных принципов организации связи в тактическом звене управления армий стран НАТО // Военная мысль. 2021. № 3. С. 140–145.
5. Дуброва И. Н., Пикуль Н. Н. Некоторые аспекты построения системы управления армейского корпуса сухопутных войск вооруженных сил США // Военная мысль. 2022. № 12. С. 139–148.
6. О. Янов. Система боевого управления Сухопутных войск США в звене «Бригада и ниже». Зарубежное военное обозрение, 2012, № 2, С. 43–50.
7. С. Плавун и С. Носиков. Система связи тактического звена управления. Единая система управления в тактическом звене. Дробление тактических единиц. Зарубежное военное обозрение, 2012, № 4, С. 42–47.
8. В. Львов и Е. Максименков. Современное состояние и перспективы развития системы связи Сухопутных войск США. Военная мысль, 2024, № 11, С. 44–51.
9. И. В. Зайцев и А. А. Молев. Системы военной радиосвязи стран НАТО и направления их развития. Военная мысль, 2014, № 10, С. 65–73.
10. А. П. Чаднов. Тенденции модернизации ВС США на основе прорывных конвергентных технологий. Вестник Военного инновационного технополиса "ЭРА", 2022, т. 3, № 2, С. 182-194.
11. В. Ю. Храмов и П. А. Чепурнов. Состояние и перспективы развития систем спутниковой связи тактического звена управления США и стран НАТО. Информация и космос, 2016, № 2, С. 22–26.

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM AND MEANS OF COMMUNICATION OF THE US ARMY

Lukyanchik V.N.<sup>1</sup>, Sorokin K.N.<sup>2</sup>

**Keywords:** *promising developments, convergent technologies, areas of activity, development programs, tactical Internet, unified management, conceptual approach, convergence.*

### Abstract

**Objective:** *analysis of the direction of development of the system and means of communication of the US Army.*

**Method:** *analytical review.*

**The result** of the analytical study is to get an idea of the trends in improving the communication and control system of the US Army. The development trend involves the transition from disparate technologies and solutions to convergent technologies. Considerable attention is paid to the JADC2 concept, focused on the creation of separate control systems for various purposes based on artificial intelligence.

A description of the "Tactical Internet" is given, based on the use of the existing groundwork of previously conducted programs for the deployment of communication networks for various purposes. Fragments of the WIN-T system are described.

The advantages obtained in the implementation of the program for the development of the communication and control system, as well as the stages of its implementation, were also indicated. These results indicate the active introduction of promising technologies, including elements of artificial intelligence, taking into account the current technological groundwork.

The description of current and suspended developments of communication and control systems allows us to judge the general directions of development and previously made erroneous decisions, the results of the implementation of development programs and the prospects for their further implementation.

**Practical value:** *the materials of the article can be used in the formation of programs for the development of the communication system of the Armed Forces of the Russian Federation both from the point of view of technical implementation of individual elements of the communication system, and from the point of view of intensification of the development of individual communication technologies that provide certain advantages in terms of the deployment of a single information space in the interests of the Armed Forces of the Russian Federation.*

<sup>1</sup>Valentin N. Lukyanchik, Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. Email: vas-nic@yandex.ru

<sup>2</sup>Konstantin N. Sorokin, Ph.D., Deputy Head of the Department of the Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. Email: vas-nic@yandex.ru

### References

1. Summary Of The Joint All-Domain Command & Control (JADC2) Strategy. Department Of Defense USA, 2022.
2. Zharov M. Sozdanie avtomatizirovannoj sistemy boevogo upravlenija vooruzhennymi silami SShA // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. 2023. № 11. S. 9–15.
3. Masalimov A. V., Akimov A. V., Udalova A. P. Obzor sistem svjazi takticheskogo zvena upravlenija vooruzhennyh sil SShA. Voennaja mysl', 2023, № 8, S. 146–157.
4. Nenadovich D. M., Nadtochij Ja. A., Kalinin S. V.. Analiz osnovnyh principov organizacii svjazi v takticheskom zvene upravlenija armij stran NATO // Voennaja mysl'. 2021. № 3. S. 140–145.
5. Dubrova I. N., Pikul' N. N. Nekotorye aspekty postroenija sistemy upravlenija armejskogo korpusa suhoputnyh vojsk vooruzhennyh sil SShA // Voennaja mysl'. 2022. № 12. S. 139–148.
6. O. Janov. Sistema boevogo upravlenija Suhoputnyh vojsk SShA v zvene «Brigada i nizhe». Zarubezhnoe voennoe obozrenie, 2012, № 2, S. 43-50.
7. S. Plavunov i S. Nosikov. Sistema svjazi takticheskogo zvena upravlenija. Edinaja sistema upravlenija v takticheskom zvene. Droblenie takticheskikh edinic. Zarubezhnoe voennoe obozrenie, 2012, № 4, S. 42-47.
8. V. L'vov i E. Maksimenkov. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija sistemy svjazi Suhoputnyh vojsk SShA. Voennaja mysl', 2024, № 11, S. 44-51.
9. I. V. Zajcev i A. A. Molev. Sistemy voennoj radiosvjazi stran NATO i napravlenija ih razvitija. Voennaja mysl', 2014, № 10, S. 65-73.
10. A. P. Chadnov. Tendencii modernizacii VS SShA na osnove proryvnyh konvergentnyh tehnologij. Vestnik Voennogo innovacionnogo tehnopolisa "JeRA", 2022, t. 3, № 2, S. 182-194.
11. V. Ju. Hramov i P. A. Chepurnov. Sostojanie i perspektivy razvitija sistem sputnikovoj svjazi takticheskogo zvena upravlenija SShA i stran NATO. Informacija i kosmos, 2016, № 2, S. 22-26.



# ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ТЕХНИКИ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Вылков А.С.<sup>1</sup>, Шатков В.Ю.<sup>2</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-40-52

## Аннотация

**Цель работы:** повышение оперативности проведения технической разведки техники связи военного назначения в местах получения боевых повреждений

**Результаты исследования:** разработан алгоритм по определению зон локального бронирования техники связи военного назначения, позволяющего повысить стойкость к воздействию поражающих факторов оружия противника. Показано, что за счет повышения стойкости повышается живучесть образцов техники связи военного назначения. Представленный подход к определению зон локального бронирования и повышения живучести техники связи военного назначения основан на применении метода конечных элементов и проведении численного моделирования. Впервые для описания поражения образцов техники связи использованы системы инженерного анализа, нашедшие широкое применение в оборонно-промышленном комплексе.

**Практическая значимость** проведенного исследования заключается в разработке инструментария повышающего показатель живучести образцов техники связи военного назначения, а также повышающие оперативность проведения технической разведки поврежденной военной техники связи.

## Введение

В современных условиях существенно возрастает роль системы связи в управлении группировками войск. Объекты связи подвергаются постоянному огневому воздействию со стороны противника. В связи с этим одним из основных приоритетов развития военной организации является не только совершенствование системы управления войсками, но и развитие системы эксплуатации и ремонта вооружения, военной и специальной техники<sup>3</sup> (ВВСТ).

Восстановление ВВСТ — это комплекс организационно-технических мероприятий (работ), направленных на приведение вышедших из строя ВВСТ в готовность к использованию (боевому применению) и возвращение их в строй. Он включает в себя такие мероприятия, как ТР, эвакуация, ремонт и возвращение в строй отремонтированных (эвакуированных), а также передачу невосстанавливаемых в соединении (частях, подразделениях) ВВСТ силам и средствам старшего начальника.

Техническая разведка (ТР) является элементом системы восстановления, которая включает в себя комплекс мероприятий по добычанию, сбору, анализу, обобщению и передаче данных, необходимых для организации и осу-

ществления технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) [1].

ТР играет важную роль в восстановлении и является одним из основных источников информации, который позволяет планировать мероприятия восстановления. Отсутствие данной информации скажется на своевременности и обоснованности, принимаемых органами управления ТОС и АСУ решений по восстановлению поврежденных образцов техники связи военного назначения (ТС ВН), а также на рациональности использования сил и средств ремонтных органов.

Актуальность исследования вопроса ведения ТР ТС ВН в современных условиях возрастает в связи с развитием новых типов оружия, а также совершенствование способов его применения противником. Наибольший акцент при ведении ТР концентрируется на бесконтактных способах выполнения отдельных мероприятий ТР на поле боя.

Целью настоящей работы является разработка и обоснование предложений по повышению оперативности проведения технической разведки в боевых условиях с учетом повышения живучести образцов ТС ВН. Введение

<sup>1</sup>Вылков Александр Сергеевич, преподаватель кафедры Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: asvylov@mail.ru

<sup>2</sup>Шатков Владислав Юрьевич, курсант Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail:

<sup>3</sup>Военная доктрина Российской Федерации (утверждена Президентом Российской Федерации 25 декабря 2014 года №ПР-2976) [Электронный ресурс]. – <http://base.garant.ru/70830556/> (дата обращения 29.01.2025 г.)

### Техническая разведка как элемент восстановления ТС ВН, ее роль и место

Техническая разведка решает следующие задачи<sup>1, 2</sup>:

- ❖ во-первых, своевременное определение местонахождения поврежденной (неисправной) ТС ВН;
- ❖ во-вторых, определение технического состояния поврежденной ТС ВН (предварительная дефектация);
- ❖ в-третьих, определение объема эвакуационных работ;
- ❖ в-четвертых, определение состояния экипажей (расчетов), механиков-водителей (водителей);
- ❖ в-пятых, изучения районов размещения (развертывания) сил и средств органов ТОС и АСУ;
- ❖ в-шестых, выбор путей эвакуации, мест перемещения, вышедшей из строя ТС ВН;
- ❖ в-седьмых, определение возможности использования местной промышленной базы.

Эти задачи можно разделить на два типа:

- ❖ технические — 2;
- ❖ организационные — 1, 3, 4, 5, 6 и 7.

Задачи 1, 2, 3 и 6 непосредственно влияют на эффективность функционирования системы восстановления.

Основными задачами ТР в ходе операции, влияющие на продолжительность ее ведения, будут 1 и 2, которые включают в себя своевременное выявление поврежденных (неисправных) ТС ВН, определения их местонахождения и технического состояния (объема ремонтных и эвакуационных работ), состояния экипажей (расчетов), механиков-водителей (водителей).

Принципы ведения ТР ТС ВН:

- ✓ ТР ведется постоянно всеми органами управления, силами и средствами ТОС и АСУ;
- ✓ количество и состав органов ТР должны обеспечить максимально возможное решение всех возложенных на нее задач;
- ✓ в первую очередь добывается информация, необходимая для решения наиболее важных задач ТОС и АСУ в конкретных условиях обстановки;

- ✓ эшелонирование органов ТР по элементам боевого порядка войск должно обеспечивать наиболее эффективное их использование.

Организация ТР включает:

- ✓ определение потребности в ТР;
- ✓ определение возможностей соединения (подразделения) по ведению ТР;
- ✓ выбор направлений ведения ТР, мест размещения, способов и порядка перемещения сил и средств ТР;
- ✓ определение и постановку задач, планирование ТР, организацию взаимодействия.

Весь комплекс задач, которые решаются ТР ТС ВН, непосредственно влияет на оперативное планирование должностным лицом мероприятий по эвакуации поврежденной техники, ее ремонта и возвращения в строй.

Таким образом, на оперативность проведения ТР влияет проведение мероприятий по определению местонахождения поврежденной ТС ВН и ее предварительная дефектация [2, 3].

Определению местонахождения пораженной ТС ВН посвящено не мало работ. Их идея заключается в применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащённых специализированной оптоэлектронной нагрузкой, которая позволит производить аэрофотосъемку местности дислокации поврежденных образцов для сокращения времени их поиска<sup>6</sup>.

Развитие способов и методов проведения предварительной дефектации рассматривались в работах, которые можно разделить по двум группам: а) распознавания образов специализированным устройством за счет обучения искусственным интеллектом и б) совершенствование способов проведения предварительной оценки технического состояния личным составом в месте их получения, за счет оценки внешней поврежденной, и принятия решения о виде ремонта [3].

С точки зрения сокращения времени на организационные и технические мероприятия технической разведки можно сказать, что данные методы и способы могут являться исчерпывающими.

Боевые повреждения, в результате воздействия противником, в современных конфликтах несут множественные повреждения, что значительно увеличивает продолжительность оценки степени повреждения и личным составом, и может вносить определённые ошибки при распознавании образов.

<sup>1</sup>Чихачев А.В., Третьяков С.М., Бурлаков А.А., Баринов М.А., Морозов Р.В. Техническое обеспечение связи и автоматизации: Учебник. - СПб.: ВАС, 2017. - 302 с.

<sup>2</sup>Воловиков В. С. Методическое обеспечение формирования комплектов военно-технического имущества связи, как инструмент повышения эффективности функционирования системы восстановления техники связи и автоматизированных систем управления [Электронный ресурс] // Системы управления, связи и безопасности. Научный сетевой электронный журнал. 2015. №1. С. 37–52. – Режим доступа: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/04-Volovikov.pdf>.

<sup>6</sup>Чихачев А.В., Третьяков С.М., Бурлаков А.А., Баринов М.А., Морозов Р.В. Техническое обеспечение связи и автоматизации: Учебник. - СПб.: ВАС, 2017. - 302 с.

Таким образом, минимизация получения боевых повреждений ТС ВН может снижать время определения вида и места дальнейшего ремонта, т.е. вопрос живучести образцов техники связи напрямую может влиять на оперативность проведения технической разведки. Требуется рассмотрение такого понятия как живучесть ТС ВН [2].

### **Применение понятия «живучесть» к ТС ВН**

Понятие живучести известно в технике давно и практически используется при создании технических систем различного назначения, однако, до сих пор не создано развитой теории, которая содержала бы, как и теория надежности, общетехнические результаты, позволяющие исследовать это свойство, оценивать его количественно и разрабатывать практические рекомендации проектировщика, сложных систем по обеспечению живучести. Вместе с тем многие источники поясняют этот термин с разных сторон<sup>7,8</sup>.

Проанализировав эти определения возможно отнесение к понятию живучести не только противостояние технической системы средствам поражения, но и скорейшее ее восстановление. Таким образом можно сказать о техническом понимании живучести, заложенном в тактико-техническом задании при конструировании техники, и организационно-техническом, связанным с процессом восстановления.

Опыт ведения специальной военной операции (СВО) показывает, что технологии конструирования современных средств поражения не стоят на месте. Разлет боеприпасов от назначенной цели даже ствольной артиллерии становится меньше, а ее применение все более эффективным.

Наиболее частым является использование осколочно-фугасных боеприпасов. Основными поражающими факторами которого являются: осколочное поле и ударная волна<sup>9</sup>.

Для военной техники связи по основным техническим требованиям в рамках живучести задается параметр стойкости к внешнему воздействию — поражающий фактор стрелкового, артиллерийского и минометного вооружения, которая смонтирована на базе бронетанкового вооружения. ТС ВН изначально при проектировании не получает защиты от осколочного поля по параметру стойкости к поражающим факторам оружия С, а принимается значение для небронированных образцов как стальной эквивалент цели толщиной 5 мм<sup>10</sup>. Вместе с тем построение аппаратных, узлов и блоков производится из материалов, не соответствующих по своим физическим свойствам, стали, и имеют вполне определенные числовые значения характеристик для сплавов алюминия.

На стойкость ТС ВН к поражающим факторам в виде осколочного поля, и ударной взрывной волны также влияет количество блоков, влияющих на ведение связи, их размещение в аппаратных, с учетом экранирования и защиты одних другими.

Если рассмотреть конструктивное построение ТС ВН, то можно сделать вывод о ее модульном построении применением базовых несущих конструкций (БНК)<sup>11</sup>. Несущая конструкция является механической конструкцией в виде корпуса, предназначенная для электронных и электромеханических систем. Обеспечивает совместимость между механическими деталями, электрическими межблочными соединениями и электронными компонентами. БНК предназначены для обеспечения: конструктивной совместимости; размерной взаимозаменяемости по габаритам и монтажным размерам электронных модулей; рационального использования площади и объема носителей; технологических конструкций.

Система построения БНК предусматривает три уровня разукрупнения, представленные на рис. 1.

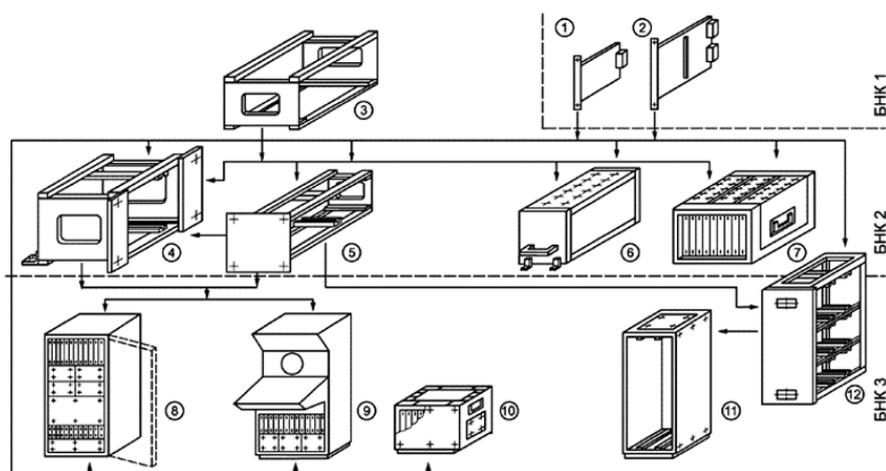
<sup>7</sup>Рябинин И. А. Пути повышения эффективности научных исследований в области живучести технических систем // Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных и управляющих систем. Материалы 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. – М.: Наука, 1988. – С. 143–152.

<sup>8</sup>Стекольников Ю. И. Живучесть систем. – СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.

<sup>9</sup>Балаганский И. А., Мерзневский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 408 с.

<sup>10</sup>Боеприпасы: учебник: в 2 т. / Под общ. ред. В. В Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 1 т.– 506 с.

<sup>11</sup>ГОСТ Р 51623-2020 Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Система построения и координационные размеры. – М.: Стандартинформ, 2020. – 19 с. ГОСТ Р 52003-2003 Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2003. – 11 с.



1, 2 – ячейки; 3 – корпус блока; 4 – блочный каркас; 5 – корпус вставного блока; 6 – корпус блока (авиационного); 7 – корпус контейнера (авиационного); 8 – корпус шкафа; 9 – корпус пульта; 10 – корпус моноблока; 11 – корпус шкафа для выдвижной стойки; 12 – выдвижная стойка

Рис. 1. Система построения и входимости БНК

БНК1 предназначены для создания электронных модулей первого уровня (ЭМ1) — ячеек и вставных блоков цифровых, и аналоговых радиоэлектронных средств (РЭС).

БНК1 может быть каркасного и бескаркасного типа. БНК1 может иметь защитный электромагнитный экран, радиатор и корпус, в том числе в герметичном исполнении. БНК1 устанавливаются в конструкции более высокого уровня разукрупнения по направляющим; в блочный каркас (БНК2) или в корпус шкафа (БНК3) — параллельно боковым стенкам.

БНК2 предназначены для создания электронных модулей второго уровня (ЭМ2). Конструктивной основой БНК2 является блочный каркас монолитный или в виде сборочной единицы, как правило разборной, состоящей из боковых стенок или рам, соединенных стяжками, в основном из алюминиевых профилей.

Блочный каркас служит для размещения в нем ЭМ1 — ячеек и (или) вставных блоков на основе БНК1 и является промежуточным конструктивным уровнем между БНК1 и БНК3. Корпус вставного блока служит для защиты функционально законченного электронного модуля первого уровня от внешних воздействий. Характерной особенностью корпуса вставного блока является наличие передней (лицевой) и задней панелей, а также фиксирующих элементов. Передняя панель служит для размещения элементов индикации и управления. Задняя панель служит для размещения элементов электрических и (или) оптоэлектронных соединений.

БНК3 предназначены для создания ЭМ3. Конструктивную основу БНК3 составляют вертикальные и горизонтальные профили, а также допускается использовать межэтажные перегородки и рамы с направляющими для установки БНК1, и БНК2.

К БНК3 относят стойки, корпуса шкафов, пультов, моноблоков, тумбы, секции, приборные столы и монтажные рамы. Одним из основных свойств БНК всех уровней является их стойкость, которая задается ГОСТами, может уточняться для отдельной аппаратуры тактико-техническим заданием на изготовление радиоэлектронных средств РЭС.

Стойкость БНК к внешним воздействующим факторам механического удара одиночного и многократного действия для радиоэлектронных средств наземных подвижных объектов задаются числом. Основными элементами конструкции аппаратуры, обеспечивающими стойкость к механическим воздействиям, являются приборные корпуса РЭС.

Приборный корпус — конструктивный уровень, который несет в себе РЭА и одновременно служит оболочкой, обеспечивающей безопасность обслуживания и защиту от механических повреждений и воздействий внешней среды.

Корпуса одноблочных и малых приборов представляют унифицированный корпус для субблоков кассетного типа состоит из каркаса, образованного двумя литыми из алюминиевого сплава рамками, соединенными между собой продольными профилированными планками.

Верх и низ каркаса закрыт перфорированными крынками и дном из тонколистового алюминиевого сплава. Унифицированный приборный корпус для блоков рамочного типа с лицевыми панелями представляет собой бескаркасную продукцию из тонколистового проката толщиной 1,8–2,0 мм, изготовленный из сплава алюминия Д16Т.

Собранные БНК ТС ВН размещаются в кузовах фургонов (КФ), кузовах-контейнерах (КК).

Автомобильный КФ, КК представляет собой кузов закрытого типа модульной конструкции (рис. 2), оснащенный техническими средствами обеспечения обитаемости личного состава и установленный на АБШ.



*Рис. 2. Общий вид КФ и КК*

Корпус КФ, КК состоит из каркаса, основания, пола, передней и задней стен и четырех модулей. В некоторых КФ три модуля. Модули образуют боковые стены, скосы и крышу корпуса КФ.

В корпусе установлены двери, люк и окна.

Пол состоит из трех панелей, которые крепятся к каркасу основания винтами. По стыкам

панелей пола с двух сторон на герметике установлены накладки на винтах и заклепках.

Соединение модулей между собой осуществляется с помощью профилей снаружи и рам изнутри.

Каркас основания КФ выполнен сварной конструкцией из стальных продольных и поперечных профилей толщиной 2,5 и 4 мм.

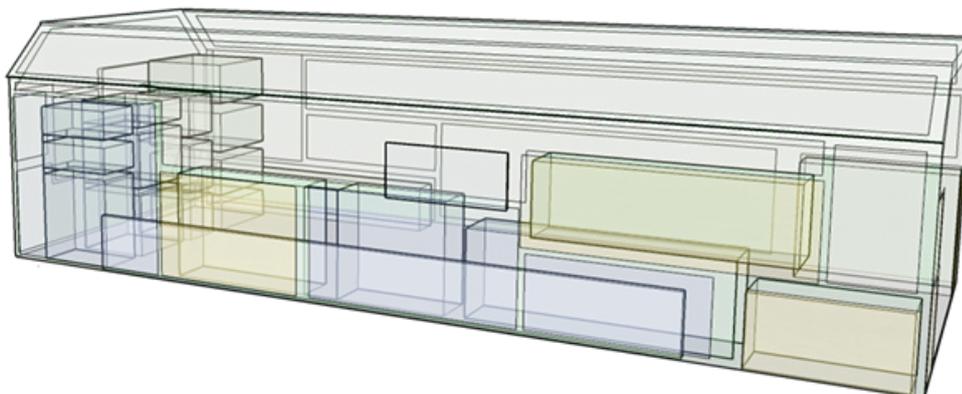
Пол, модули и стены выполнены из трехслойных металлических панелей толщиной 45 мм. Наружная и внутренняя обшивка панелей — листы из алюминиевого сплава Д16 АТ или Амг — 2Н2.

Как правило, КФ, КК может разделяться на отсеки по своему функциональному назначению. Аппаратуру и оборудование можно сгруппировать и классифицировать следующим образом [2]:

- ✓ средства связи и передачи данных;
- ✓ аппаратура внутренней связи коммутации и управления;
- ✓ антенно-мачтовые устройства;
- ✓ комплекс средств автоматизации управления;
- ✓ навигационные средства;
- ✓ вводно-соединительное оборудование;
- ✓ блоки и устройства системы электроснабжения;
- ✓ элементы системы жизнеобеспечения.

Средства связи, вспомогательное оборудование и другие указанные выше системы размещаются в КФ различных марок (рис. 3).

Основной технологической особенностью является исполнение боковых панелей, крыши, скосов крыши без комплекта для обеспечения стойкости к воздействию осколков и ударной волны. ТС ВН смонтированная на различных АБШ и не имеет средств бронезащиты (противопульной и противоосколочной защиты КФ и кабины автомобиля).



*Рис. 3. Размещение аппаратуры связи в аппаратной*

Основное и вспомогательное оборудование в аппаратных связях распределено по всей площади КФ неравномерно (рис. 3). С разных сторон аппаратных возможно различное размещение аппаратуры связи, блоков различных габаритов. Аппаратура связи закреплена в стойках, закрепленных к полу, боковым панелям. Вводно-соединительное оборудование проходит по боковым панелям КФ.

В аппаратных связях возможно размещение нескольких комплектов однотипной аппаратуры связи, также возможна при размещении защита одних блоков другими.

Таким образом, живучесть ТС ВН зависит от свойств материалов, из которых изготовлены узлы, приборные корпуса, блоки, определяющие стойкость к внешним воздействиям, и их компоновка, размещение друг относительно друга. С целью определения стойкости к внешним поражающим факторам в имеющейся структуре ТС ВН необходимо провести моделирование огневого воздействия.

**Постановка задачи**

Основная цель моделирования заключается в установлении взаимосвязи количества пробитых корпусов блоков ТС ВН, размещенных внутри КФ  $l_{пр}$  от воздействия осколков различных размеров  $S$ , масс  $m$ , скорости соударения осколка с ТС ВН  $v$ , с учетом стойкости, определенной физико-механическими характеристиками материалов, из которых изготовлена ТС ВН  $C$ , а также компоновки блоков внутри КФ (КК)  $D$ , ввиду их возможного размещения друг за другом и защиты одних блоков другими, так как прохождение осколка через каждый корпус блока ТС ВН ослабляет его поражающие характеристики

$$l_{пр} = f(S, m, v, C, D). \tag{1}$$

**Моделирование процесса поражения ТС ВН**

В соответствии с поставленной задачей разработана модель определения характеристик стойкости к внешним поражающим факторам (рис. 4).

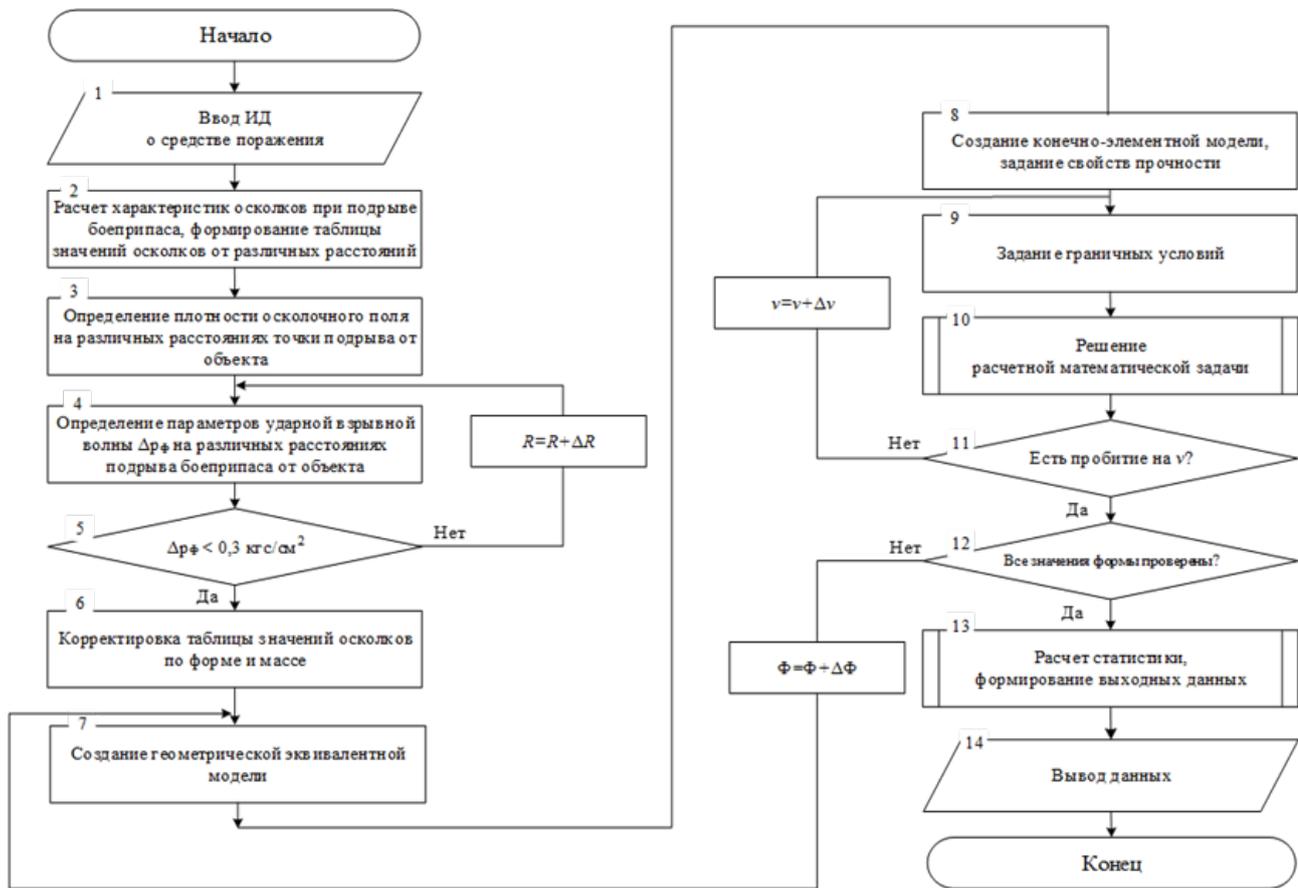


Рис. 4. Модель определения характеристик стойкости к внешним поражающим факторам

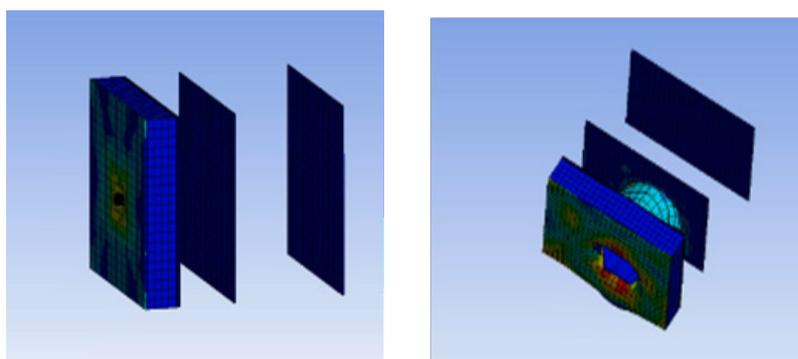
Исходные данные модели (блок 1): характеристики используемых боеприпасов различного калибра; физико-механические свойства материалов, из которых изготавливаются блоки ТС ВН, и осколков.

Параметры осколков рассчитаны по известным эмпирическим формулам, на основе полученных характеристик (размер  $\Phi$ , скорость  $v$ , масса  $m$ ) сформирована таблица (блоки 2–6)<sup>12</sup>.

Образец ТС ВН представлен набором эквивалентных преград (пластин), находящихся

на пути полета осколков. В качестве материала для пластин использован сплав дюралюминия Д16Т, для осколков — высокоуглеродистая сталь. Смоделирован высокоскоростной удар осколков разных размеров по пластинам под различными углами атаки осколков и при различном удалении  $R$  от места подрыва боеприпасов (блоки 7–12).

Пробитие различного количества пластин соответствует глубине прохождения осколков через блоки, размещенные внутри КФ ТС ВН (блоки 13, 14), (рис. 5).



*Рис. 5. Графическое представление результатов моделирования поражения ТС ВН*

В основу моделирования положен метод конечно-элементного анализа [5]. С использованием данного метода и использованием системы инженерного анализа ANSYS LS-DYNA получены результаты оценки стойкости образцов ТС ВН [6].

Таким образом, моделируя воздействие осколков боеприпасов, определяем значение количества поврежденных блоков в ТС ВН и рассчитываем расстояние, на котором обеспечивается стойкость к воздействию поражающих факторов обычного оружия. При расчетах были получены значения о границах не действия поражающего фактора ударной взрывной волны около 15 метров от точки подрыва. Зная характеристики стойкости от осколочного поля с учетом взаимного расположения, друг относительно друга блоков ТС ВН, можно добиться локальной защиты отдельных зон аппаратных при использовании для бронирования известных материалов.

Предложение по повышению оперативности проведения предварительной дефектации с учетом повышения живучести ТС ВН

Настоящие предложения представляют собой рекомендации по расчету зон защиты и их локального бронирования при построении аппаратных связи. Предложения распространяются на все типы средств связи. В основу предложений заложены результаты проведенного моделирования.

В настоящее время использование аппаратных связи в зоне проведения СВО очень ограничено. Связано это прежде всего как с приоритетной задачей их уничтожения, как объекта управления, так и слабой стойкостью к различным внешним воздействующим факторам оружия.

Активно проводится работа в НПО по изготовлению защиты на низкостойкие объекты к осколочному полю. Для транспортных средств в зоне СВО уже изготовлен комплект легкого фрагментарного дифференцированного бронирования, защищающий двери, радиатор, кабину, бензобак от осколочного поля, обеспечивающие эффективную защиту по классу БР4 и БР3. Классы приведены в таблице 1.

<sup>12</sup>Балаганский И. А., Мерзневский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 408 с. Боеприпасы: учебник: в 2 т. / Под общ. ред. В. В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 1 т. – 506 с.

Таблица 1

Таблица классов защиты

Класс защитной структуры	Наименование средства поражения	Оружие	Тип сердечника	Масса, г	Скорость, м/с	Дистанция обстрела, м
Основные классы защиты						
Бр1	9 × 18 мм пистолетный патрон с пулей Пст, инд. 57-Н-181С	9-мм АПС, инд. 56-А-126	Стальной	5,9	335 ± 10	5 ± 0,1
Бр2	9 × 21 мм патрон с пулей П, инд. 7Н28	9-мм СР-1, инд. 6П53	Свинцовый	7,93	390 ± 10	5 ± 0,1
Бр3	9 × 19 мм патрон с пулей Пст, инд. 7Н21	9-мм ПЯ, инд. 6П35	Стальной	5,2	455 ± 10	5 ± 0,1
Бр4	5,45 × 39 мм патрон с пулей ПП, инд. 7Н10	5,45-мм автомат АК74, инд. 6П20	Стальной термоупрочнённый	3,5	895 ± 15	10 ± 0,1
	7,62 × 39 мм патрон с пулей ПС, инд. 57-Н-231	7,62-мм автомат АКМ, инд. 6П1	Стальной термоупрочнённый	7,9	720 ± 15	10 ± 0,1

Основной проблемой при разработке фрагментарного бронирования является утяжеление транспортного средства, а именно нагрузка на АБШ, что влияет на маневренность, дальность хода на одной заправке, а также расходе горючего.

Предполагается на этапе разработки ТС ВН

дополнить образцы навесными бронепанелями исходя из разницы между максимальной полной массы АБШ, и массы образца ТС ВН. АБШ КамАЗ-5350, в соответствии с ТТХ, имеет полный вес 15,85 т. Основные массы образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Массовые характеристики некоторых образцов ВВСТ

Наименование	Полный максимальный вес АБШ КамАЗ, т	Масса образца, т.
Р-166	15,85	14,80
Р-149АКШ-1		13,50
Р-419Л1		11,90
П-240И4		14,50

Исходя из приведенных значений массовых характеристик, можно сделать вывод, что есть возможность дополнительно использовать свободный вес.

Конечно же данная возможность массовых характеристик не позволяет полностью произвести бронирование. Стоит рассмотреть возможность локального бронирования наиболее важных зон, для ведения связи. С точки зрения важности есть два варианта:

- ❖ бронирование зоны аппаратной, составляющую наибольшее значение для организации

связи;

- ❖ бронирование локальной зоны для защиты мест размещения личного состава.

Второй вариант очень важен, и данная работа не решает его. Также, как и не решает вопрос о разработке новых современных средств бронезащиты. Данные подходы рассматриваются в других профильных организациях. В работе же рассматривается вопрос площадной зональной защиты ТС ВН. Рассмотрим основные средства бронезащиты, которые уже используются, и оценим их с точки зрения весовых характеристик (таблица 3).

Таблица технико-экономических характеристик различных вариантов брони

Класс защиты	Материал/структура	Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	Толщина защитной структуры, мм	Оценочная стоимость, руб/1м <sup>2</sup> с НДС
Бр2	СВМПЭ	8	8	50000
	СВМПЭ+Арамид	11	12	30000
	Алюминий	16	5,9	30000
	Титан	14	3,1	50000
	Сталь броневая	20	2,6	7000
Бр3	Титанкерамическая броня с композитным подпором	23	5,1	120000
	СВМПЭ	22	22	130000
	СВМПЭ+Арамид	26	24	75000
	Алюминий	33	12,2	90000
	Титан	32	7,0	125000
	Сталь броневая	39	5,0	12000
Бр4	Титанкерамическая броня с композитным подпором	42	9,2	160000
	Титан	50	11,0	200000
	Керамика на основе корунда на композитной подложке	40	19	140000
	Керамика на основе карбида кремния на композитной подложке	35	18	240000
	Керамика на основе карбида бора на композитной подложке	21	19	360000
	Сталь броневая	52	6,7	17000

Наиболее перспективными вариантами для локального бронирования будут являться варианты, обеспечивающие максимально легкие массовые характеристики, при наибольшей площади защиты. Как было указано выше, в настоящее время уже есть разработки, представляющие собой навесную защиту для транспортных средств. В качестве основного материала используется сверхвысокомолекулярный (СВМПЭ) полиэтилен, из которого образуются слои (бронепанели). Данный материал позволяет облегчить максимально вес защиты, при достижении защиты по классу Бр3 и Бр4.

В соответствии с ранее полученными

результатами моделирования, при попадании осколка в объект, наименьший ущерб будет нанесен при попадании под углом не более 17 градусов (угол рикошетирования). При угле больше происходит пробитие преграды, однако до угла в 25 градусов пробитие будет только обшивки. Это связано прежде всего с приведенным свойством при угловой атаке. То есть, осколку приходится проходить путь в материале больше, чем есть его толщина.

Таким образом при пробитии преград под определенным углом, результат повреждения блоков будет зависеть от их размеров, и расстоянии, на котором они находятся. Схема представлена на рис. 6.

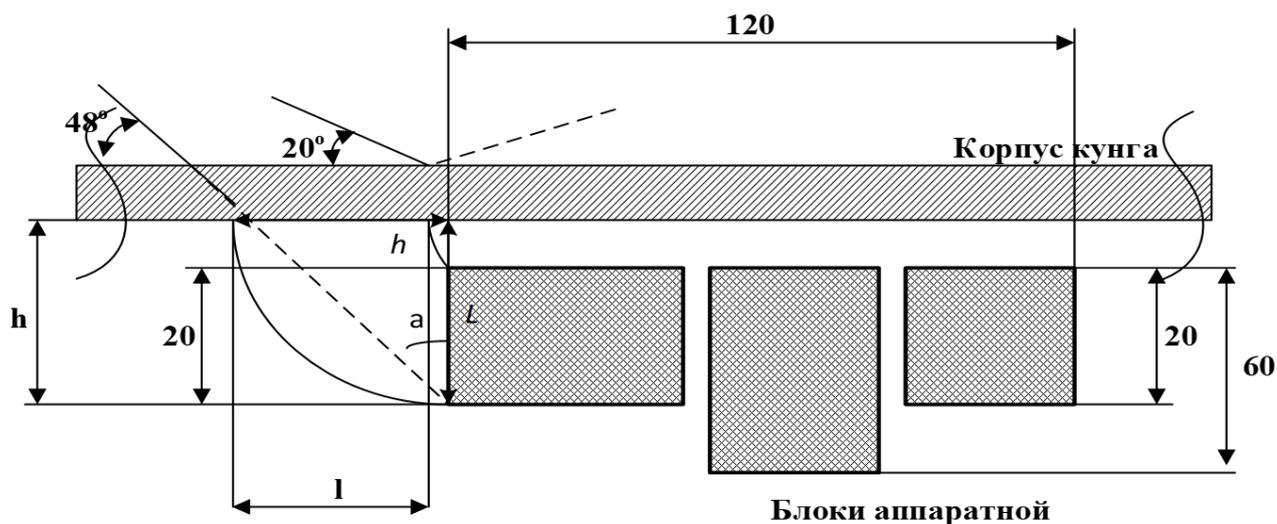


Рис. 6. Размещение основных блоков за корпусом КФ

Рассматривая данную схему, можно отметить, что при локальном бронировании наиболее важных проекций от аппаратуры на стенки кунгов недостаточно будет использовать только проекцию под прямыми углами, также необходимо бронировать превышения от проекций, на величину равную соотношению:

$$h = L \operatorname{tg}(\alpha) \quad (2)$$

где

$h$  — превышение, см;

$L$  — расстояние до стенки кунга от края блока аппаратуры, см;

$\alpha$  — угол уклона в градусах.

Практические расчеты при моделировании атаки под углом показывают, что достаточным расстоянием превышения можно считать угол уклона в 50 градусов.

Определив необходимые расстояния для локального бронирования, оценим весовые характеристики бронеплиты СВМПЭ. Имеющиеся расчетные данные показывают, что две плиты размерами 1800 мм на 480 мм по БРЗ классу защиты имеют вес 40 кг.

На рис. 7 приведен КФ от аппаратной ТС ВН небронированного типа с размерами.

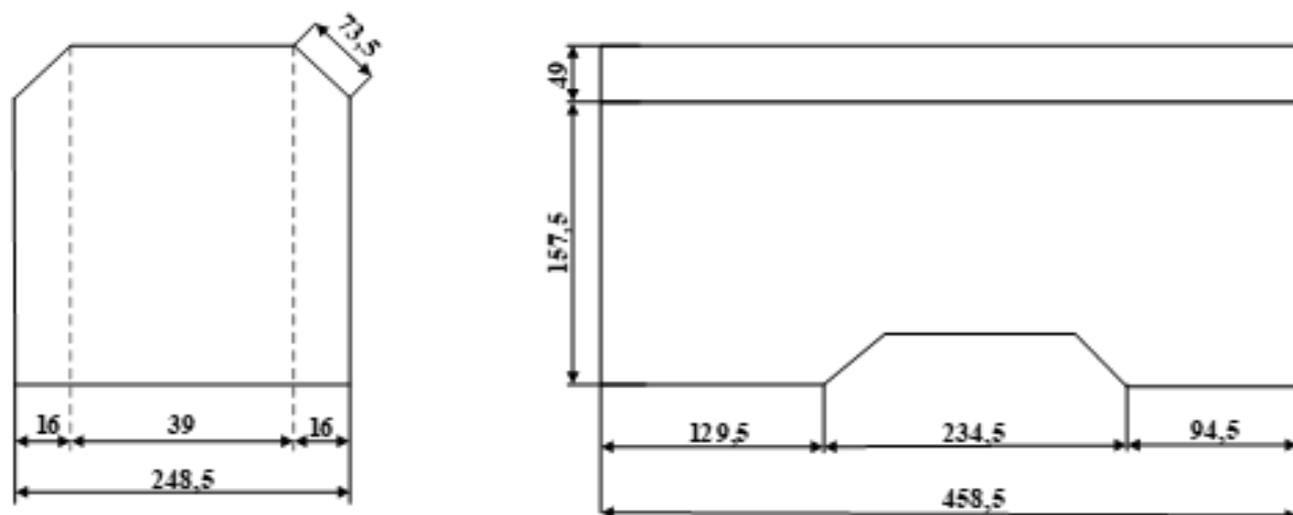


Рис. 7. КФ ТС ВН

При размещении аппаратуры в передней части кунга для покрытия ее проекции с учетом допуска необходимо 11 пластин размером 1800\*480 мм, что при весе двух пластин в 40 кг составит не более 300 кг нагрузки на АБШ. Размещение пластин возможно рассмотреть внутри кунга, до начала монтажа ТС ВН. Также возможен монтаж и на внешнюю сторону, что показал комплект легкого фрагментарного дифференцированного бронирования для транспортных автомобилей.

Зная поверхностную плотность материала (таблица 3) и размеры, возможно получить значение массы:

$$m = Lwd \quad (3)$$

$m$  — масса, кг;  
 $L, w$  — длина и ширина проекции, см.  
 $d$  — поверхностная плотность, кг/м<sup>2</sup>.

Описанный подход к расчету площади защиты формулируется в виде блок-схемы (рис. 8). Заключение

Проведение локального бронирования отдельных зон ТС ВН, наиболее важных для ве-

дения связи, позволит уменьшить количество пораженных блоков, размещенных в них, и при проведении предварительного определения технического состояния ТС ВН, пораженной противником, заметно сократить время осмотра данного образца [6].

Таким образом, за счет повышения живучести образцов ТС ВН в конечном счете возможно также повысить оперативность проведения и технической разведки.

### Заключение

Проведение локального бронирования отдельных зон ТС ВН, наиболее важных для ведения связи, позволит уменьшить количество пораженных блоков, размещенных в них, и при проведении предварительного определения технического состояния ТС ВН, пораженной противником, заметно сократить время осмотра данного образца [6].

Таким образом, за счет повышения живучести образцов ТС ВН в конечном счете возможно также повысить оперативность проведения и технической разведки.

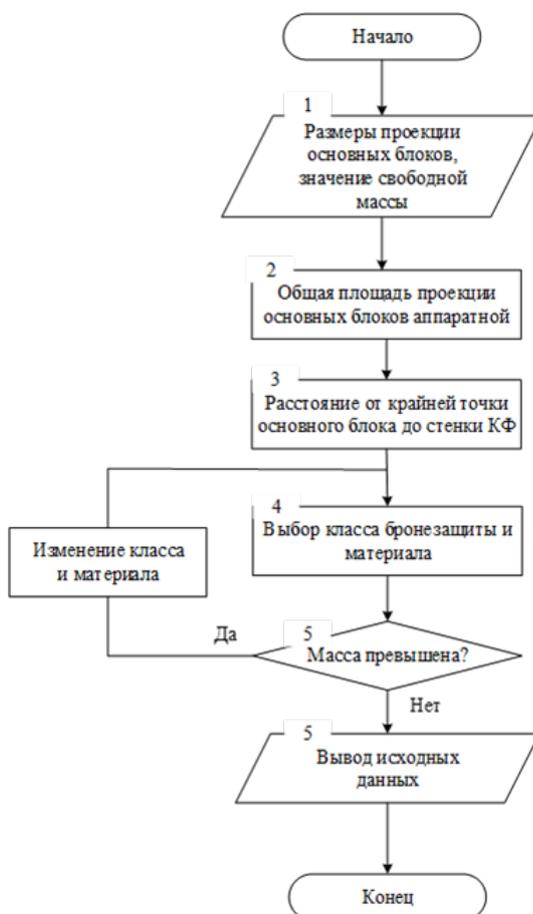


Рис. 8. Блок-схема программного средства

## Литература

1. Шептура В.Н., Чихачев А.В., Питенко В.А. Современное состояние и перспективы развития системы ТОС и АСУ Вооруженных Сил Российской Федерации // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Сборник трудов VII межвузовской научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 25 марта 2022 г.). – СПб.: ВАС, 2022. – С. 10-15.
2. Семенов С.С., Вылков А.С., Ерыгин В.В. Анализ научно-методического аппарата для проведения предварительной дефектации техники связи военного назначения в условиях огневого поражения противника // Техника средств связи. 2022. - №4 (160). – С. 45-58.
3. Семенов С.С., Вылков А.С., Киселев Д.В. Математический аппарат методики проведения предварительной дефектации // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Сборник трудов VIII межвузовской научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 14 апреля 2023 г.). – СПб.: ВАС, 2023. – С.92-95.
4. Манилюк Е.П., Гречишников Е.В., Гилядзинов М.С. Моделирование отказов и восстановлений средств связи // промышленные АСУ и контроллеры. 2023. №6. С. 24-27.
5. Зузов В.Н. Численное моделирование высокоскоростного удара по алюминиевой пластине в ANSYS и LS-DYNA: учебно-методическое пособие / Р. Б. Гончаров, В. Н. Зузов. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 28 с.
6. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 2022. – 240 с.

## IMPROVEMENT OPERATIONAL EFFICIENCY OF TECHNICAL RECONNAISSANCE OF MILITARY COMMUNICATIONS EQUIPMENT

Vylkov A.S.<sup>1</sup>, Shatkov V.Yu.<sup>2</sup>

**Keywords:** technical reconnaissance, survivability, recovery, military communication equipment, finite element method, local armor, defeat factors, ANSYS LS-DYNA.

### Abstract

**Purpose of work:** increase of operability of technical reconnaissance of military communication equipment in the place of receiving combat damage at the expense of increase of survivability of samples at definition of zones of local armor.

**Research results:** the goal is achieved by developing an algorithm for determining the local armor zones of military communications equipment, which allows to increase the resistance to the impact of enemy weapons. By increasing the resistance it is possible to increase the survivability of military communications equipment.

**Scientific novelty:** the presented approach to determining the zones of local armor and increasing the survivability of military communications equipment is based on the application of the finite element method and numerical modeling. For the first time for description of defeat of communication equipment samples the systems of engineering analysis, which have found wide application in the defense-industrial complex, are used. Practical significance of the conducted research lies in the development of tools increasing the survivability index of military communication equipment samples, as well as increasing the efficiency of technical reconnaissance of damaged military communication equipment.

### References

1. Sheptura V.N., Chihachev A.V., Pitenko V.A. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija sistemy TOS i ASU Vooruzhennyh Sil Rossijskoj Federacii // Problemy tehničeskogo obespečenija vojsk v sovremennyh uslovijah: Sbornik trudov VII mezhvuzovskoj nauchno-praktičeskoi konferencii (g. Sankt-Peterburg, 25 marta 2022 g.). – SPb.: VAS, 2022. – S. 10-15.
2. Semenov S.S., Vylkov A.S., Erygin V.V. Analiz nauchno-metodičeskogo apparata dlja provedenija predvaritel'noj defektacii tehnik svjazi voennogo naznachenija v uslovijah ognеvogo porazhenija protivnika // Tehnika sredstv svjazi. 2022. - №4 (160). – S. 45-58.

<sup>1</sup>Vylkov Alexander Sergeevich, Lecturer, Department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg, Russia. E-mail: asvylkov@mail.ru

<sup>2</sup>Vladislav Yuryevich Shatkov, cadet, Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny Military Academy of Communication, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg, Russia

3. Semenov S.S., Vylkov A.S., Kiselev D.V. Matematicheskij apparat metodiki provedenija predvaritel'noj defektacii // Problemy tehničeskogo obespečenija vojsk v sovremennyh uslovijah: Sbornik trudov VIII mezhvuzovskoj nauchno-praktičeskoi konferencii (g. Sankt-Peterburg, 14 apreļa 2023 g.). – SPb.: VAS, 2023. – S.92-95. Volovikov V. S. Methodological support of the formation of military-technical property sets of communication as a tool to improve the efficiency of the system of restoration of communication equipment and automated control systems [Electronic resource] // Control Systems, Communications and Security. Scientific network electronic journal. 2015. №1. P. 37-52. - Access mode: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/04-Volovikov.pdf>.
4. Maniljuk E.P., Grechishnikov E.V., Giljadzinov M.S. Modelirovanie otkazov i vosstanovlenij sredstv svjazi // promyshlennye ASU i kontrollery. 2023. №6. S. 24-27.
5. Zuzov V.N. Chislennoe modelirovanie vysokoskorostnogo udara po aljuminievoj plastine v ANSYS i LS-DYNA: uchebno-metodičeskoe posobie / R. B. Goncharov, V. N. Zuzov. – Moskva: Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Bauman, 2022. – 28 s.
5. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Y.V. Fundamentals of work in ANSYS 17. - Moscow: DMK Press, 2017. - 210 p.
6. Birger I.A. Technical diagnostics. - Moscow: Mashinostroenie, 2022. - 240 p.



# ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОТОКОЛА МОНИТОРИНГА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ УЗЛА СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Боговик А.В.<sup>1</sup>, Сафиулов Д.М.<sup>2</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-53-64

**Ключевые слова:** удаленная диагностика, адаптивный сбор данных, иерархические структуры MIB (Management Information Base), полевые условия, радиоэлектронное противодействие, надежность каналов, интеллектуальная конфигурация, гибкая детализация

## Аннотация

**Целью** статьи является анализ существующих методов сбора и обработки данных о состоянии телекоммуникационного оборудования сетей связи специального назначения и разработка предложений по реализации удаленной адаптивной диагностики, учитывающей особенности полевых условий и высокие требования к скрытности.

**Методы** исследования заключаются в использовании механизмов сравнительного анализа в процессе управления сетевыми устройствами, формализованных моделей полноты информации и алгоритмов необходимого покрытия для оптимизации структуры набора применяемых датчиков. В качестве методологической основы послужили труды по повышению устойчивости сенсорных сетей в условиях ограничения ресурсов, проведены моделирование и экспертная оценка, позволившие выявить ключевые показатели эффективности предложенного подхода.

**Результаты** исследования. В ходе работы проанализированы проблемы, возникающие при эксплуатации узлов связи в условиях ограниченной пропускной способности каналов и высокого риска радиоэлектронного противодействия. Показано, что стандартный механизм удаленного мониторинга, предусматривающий постоянную детализацию и равномерную частоту опроса, в боевой обстановке приводит к избыточному объему служебного трафика и может демаскировать важные элементы инфраструктуры. Разработанная стратегия позволяет динамически менять глубину диагностирования и интервалы получения данных, избегая перегрузки сетевых ресурсов. Это достигается благодаря дополнению библиотеки параметров MIB новыми идентификаторами и Trar-сообщениями, которые активируются только при выявлении угроз или отклонений от нормальных режимов работы. Предложенный подход значительно сокращает время обнаружения неисправностей, повышает оперативность их устранения и уменьшает риск потери критической информации, что крайне важно для полевых систем военного назначения и сопряженных с ними узлов связи. Кроме того, детально рассмотрены алгоритмы адаптивной частоты опроса, позволяющие снизить нагрузку в периоды стабильной работы и немедленно повысить чувствительность мониторинга при возникновении нестандартных ситуаций. Такая гибкость обеспечивает как эффективную диагностику, так и необходимый уровень скрытности.

**Научная новизна** работы заключается в предложении формальных моделей, основанных на эффективной полноте данных и задачах покрытия, позволяющих количественно обосновывать выбор глубины мониторинга и частоты опроса. Введение новых идентификаторов и сообщений в MIB раскрывает дополнительные возможности для интеллектуальной перенастройки агентов мониторинга с учетом динамики обстановки и ограниченных ресурсов канала.

## Введение

Современные системы мониторинга телекоммуникационного оборудования в основном проектировались для стационарных сетей с высокой пропускной способностью. Однако в ходе современных операций каналы связи работают в условиях дефицита пропускной способности, а

интенсивное огневое и радиоэлектронное противодействие серьезно затрудняет их стабильное функционирование. Как отмечается в [1, 2, 3], необходимость оперативного предоставления услуг связи органам военного управления часто приводит к несбалансированным настройкам протоколов маршрутизации, параметров QoS (набор

<sup>1</sup>Боговик Александр Владимирович, кандидат военных наук, профессор, профессор кафедры Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bogovikav@mail.ru

<sup>2</sup>Сафиулов Давлет Муратович, адъюнкт Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: davletzas@mail.ru

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<sup>3</sup> [2]. В связи с этим обеспечение более качественного мониторинга технического состояния ТКО становится приоритетной задачей для систем управления связью, требующей внедрения модульных механизмов контроля параметров, таких как динамическая адаптация частоты опроса и глубины диагностирования. Реализация эффективного протокола мониторинга, интегрированного с возможностями адаптивного управления, может стать решением вопросов отказоустойчивости и оперативности систем связи в условиях ограниченных ресурсов и деструктивных воздействий.

Классический протокол мониторинга *SNMP* (*Simple Network Management Protocol*), основанный на механизме «менеджер-агент» и операциях *Get/Set/Trap/Inform* [3], широко используется в составе различных систем, включая решения на базе специального программного обеспечения наподобие *Zabbix* (по результатам проведенного анализа [4], это одна из наиболее распространенных реализаций). Однако традиционная спецификация *SNMP* не предусматривает гибкого изменения глубины мониторинга и частоты опроса. При низкоскоростных каналах и высоком риске потерь подробный мониторинг перегружает сеть, однако в критические моменты требуется немедленная детальная информация о состоянии эксплуатируемых объектах на узлах связи. Так возникает противоречие: нужно минимизировать трафик в штатном режиме и уметь быстро повышать полноту данных при обнаружении существенных аномалий в работе ТКО и/или падения качества услуг связи.

Актуальность модернизации простого протокола мониторинга *SNMP* обусловлена необходимостью динамически выбирать степень детализации и частоту опроса, что позволяет экономить ресурсы при нормальных условиях и оперативно наращивать объем собираемой информации в случае угроз. В настоящей статье обосновывается возможность такого подхода, предлагаются

механизмы расширения библиотеки параметров *MIB* (*Management Information Base*) и описываются сценарии внедрения, ориентированные на узлы связи специального назначения.

### Постановка задачи

Требуется разработать и формально обосновать расширенный вариант протокола мониторинга *SNMP*, предназначенный для управления состоянием ТКО узлов связи в полевых условиях с ограниченной полосой пропускания и высоким риском деструктивных воздействий. Предполагается дополнить стандартные операции (*Get, Set, GetNext, Trap, Inform*) механизмами динамического управления глубиной диагностики ( $\tau$ ) (через *OID* типа *oidDetailLevel*) и частотой опроса ( $f$ ) (через *oidSamplingFreq*).

Для формализации возникающего компромисса используются положения теории достаточной статистики [5], согласно которым эффективность диагностики возрастает по мере увеличения полноты данных, но избыточное количество и слишком частый сбор информации перегружают сеть и замедляют анализ. Пусть  $U_{эфф}(\tau, f)$  — эффективная полнота информации, достигаемая при выбранных  $\tau$  и  $f$ . Тогда время диагностики отказа  $T_{диагн}$  можно оценивать через рациональную аппроксимацию:

$$T_{диагн}(\tau, f) = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \frac{U_{мин}}{U_{эфф}(\tau, f)}}$$

где:  $U_{мин}$  — минимально допустимая полнота для запуска корректных алгоритмов восстановления, а  $\alpha$  характеризует, насколько критичен дефицит данных. При этом рост  $\tau$  и  $f$  ведет к увеличению загрузки канала, которую можно условно представить функцией затрат ресурсов  $R(\tau, f)$ .

Таким образом, оптимизационная постановка сводится к выбору  $\tau$  и  $f$  следующим образом:

$$\min_{\tau, f} R(\tau, f) \Big|_{U_{эфф}(\tau, f) \geq U_{мин}}$$

то есть требуется минимизировать нагрузку на сеть при обеспечении достаточной полноты информации. Рассматриваемое расширение *Management Information Base* (*MIB*) включает новые *OID*, отражающие заданные  $\tau$  и  $f$ , а также дополнительные типы *Trap*-сообщений. Существенным элементом является адаптивное изменение этих параметров в оперативном режиме при возникновении критических факторов (воз-

<sup>3</sup>Боевое применение подразделений связи, узлов связи соединений, объединений сухопутных войск. Учебник: Часть 2 / Под ред. О. П. Тевса. – СПб.: ВАС, 2021. – 476 с.

растание помех, колебания температур, перебои электропитания), что позволяет автоматизированно переходить от ограниченного мониторинга к детальному без чрезмерной нагрузки на сеть в нормальных условиях эксплуатации.

### Анализ условий эксплуатации и необходимость адаптивного мониторинга

Условия ведения современных операций осложняются не только наличием огневого воздействия противника, но и масштабным радиоэлектронным и информационным противодействием. Использование средств подавления связи может приводить к фрагментации и даже временному исчезновению некоторых каналов [6]. Пропускная способность при этом становится крайне ограниченной, а задержки в передаче данных возрастают. Стандартный SNMP, ориентированный на стабильные каналы, не предусматривает эффективных механизмов адаптации. Например, при попытке использовать подробные MIB-объекты в условиях высокой потери пакетов возрастает вероятность недостоверности данных, и повторные опросы могут существенно ухудшить оперативность процесса сбора информации.

Дополнительная проблема связана с климатическими особенностями регионов, где развертываются узлы связи специального назначения. Экстремальные температурные режимы, сильные порывы ветра и резкие колебания влажности приводят к сбоям в работе ТКО, что требует повышения точности мониторинга их технического состояния. Наряду с этим, нестабильное электроснабжение, вызванное перегрузками на электрогенераторах, приводит к кратковременным отключениям оборудования, что усиливает потребность в оперативном контроле. При этом традиционная реализация SNMP, основанная на постоянном высоком уровне детализации и частом опросе, перегружает и без того низкоскоростные каналы связи, что негативно сказывается на своевременности и точности диагностики.

Особую актуальность приобретает требование по обеспечению скрытности обмена данными. При активном функционировании системы мониторинга избыточный трафик может быть обнаружен средствами радиоэлектронной разведки противника [6], что повышает риск идентификации и последующего подавления ключевых каналов связи. Требования безопасности связи диктуют необходимость минимизации служебного трафика в режимах нормальной работы, с переходом в режим повышенного сбора данных лишь при возникновении критических ситуаций. Стандартный SNMP не предусматривает механизмов динамического изменения частоты опро-

са и глубины диагностирования, что ограничивает его применение в условиях, где требуется адаптивное управление информационными потоками. В источниках по системам военного назначения [7, 8] подчеркивается важность внедрения интеллектуальных алгоритмов мониторинга, способных учитывать текущую радиочастотную обстановку и оперативно корректировать политику сбора данных. Таким образом, адаптивный механизм мониторинга является необходимым ответом на ограничения пропускной способности каналов, угрозу перехвата информации, нестабильность энергоснабжения и неблагоприятные климатические условия. В предлагаемом решении модернизация SNMP достигается за счет дополнения MIB новыми идентификаторами и введения дополнительных Trap/Inform-сообщений, что позволяет оператору централизованно регулировать уровень детализации и частоту запросов. Такая архитектурная модификация обеспечивает возможность оперативного переключения между режимами минимального обмена данными в стандартном режиме эксплуатации к режиму детального анализа при возникновении критических событий, что существенно повышает отказоустойчивость системы без избыточной нагрузки на каналы связи.

### Модель эффективной полноты информации мониторинга

Разработка адаптивных стратегий невозможна без формализации самого понятия «полнота информации», нужной для диагностики. Одним из подходов к количественной оценке полноты целесообразно считать подход моделирования эффективной полноты информации, в которой вводятся параметры и весовые коэффициенты, показывающие, какой набор данных и с какой точностью необходим пользователю на различных уровнях управления. При этом показателем эффективной полноты  $U_{эфф}(\varepsilon, \tau)$  может быть показатель, учитывающий, степень детализации, важной для конкретного уровня управления ( $\varepsilon$ ) и класса информационных требований ( $\tau$ ).

В более общем виде модель эффективной полноты информации может быть записана следующим образом:

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

где:

$\varepsilon$  — параметр, характеризующий иерархический уровень пользователя (например, более высокий уровень управления требует более агрегированной, но менее детализированной инфор-

мации);

$\tau$  — параметр, отражающий класс информационных требований (набор параметров или профиль данных, необходимых для данного уровня управления);

значения  $U_i$  соответствуют базовой полноте  $i$ -го класса данных, а  $w_i(\varepsilon, \tau)$  — весовые коэффициенты, отражающие значимость данного класса данных для конкретного иерархического уровня и информационного профиля.

Реальная эффективность диагностики зависит не только от количества собираемых данных, но и от того, насколько оперативно они могут быть получены и обработаны. Для учета этой временной компоненты используется поправочный множитель, отражающий чувствительность процесса устранения отказа к отношению  $U_{\min} / U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)$ , где  $U_{\min}$  — минимально необходимая полнота для запуска корректных алгоритмов диагностики. Исходя из общих идей теории достаточной статистики [6], время диагностики и устранения неисправностей может расти при недостающем объеме данных. Для этой зависимости часто используется рациональная аппроксимация:

$$\Delta T_{\text{диагн}} = \frac{1}{1 + \alpha \frac{U_{\min}}{U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)}}$$

где  $\alpha$  характеризует, насколько критично уменьшение полноты данных относительно необходимого минимума. При  $U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau) \gg U_{\min}$  значение  $\Delta T_{\text{диагн}}$  близко к 1, то есть дополнительные задержки в диагностике практически отсутствуют. Если же  $U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)$  близко к  $U_{\min}$  или даже меньше, то  $\Delta T_{\text{диагн}}$  уменьшается, отражая рост временных затрат на уточнение и верификацию ограниченных данных. При этом своевременность и полнота диагностики ТКО напрямую влияют на время восстановления работоспособности узла связи (включая замену неисправных компонентов, перегруппировку маршрутов и т.д.).

Применительно к элементам телекоммуникационных сетей специального назначения, где установка дополнительных датчиков или модулей слежения часто ограничена весовыми, энергетическими и маскировочными требованиями, необходимо найти компромисс между развернутым сбором сведений обо всех потенциальных сбоях и минимально достаточным набором параметров, который обеспечивает заданный уровень готовности и быстрого реагирования. Слишком подробная информация увеличивает трафик, усложняет передачу и анализ данных, но при этом

ускоряет поиск неисправностей. Недостаточная информация снижает точность, может задержать принятие решения о ремонте и вызвать дополнительные риски при эксплуатации в боевых условиях. Введение в *SNMP* механизма динамического управления глубиной мониторинга и частотой опроса позволяет приблизиться к оптимальному балансу, когда  $U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)$  превышает  $U_{\min}$  ровно в той мере, в которой это необходимо по текущей обстановке, не создавая лишнего трафика при нормальном режиме функционирования телекоммуникационной сети.

### Методологические подходы

#### к оптимизации структуры системы мониторинга

Для того чтобы предложенная модель была работоспособной, необходимо сформулировать задачу формирования и выбора оптимального варианта набора мониторинговых параметров (или датчиков) и адаптивной частоты опроса, соответствующей текущим условиям. В литературе по беспроводным сенсорным сетям [9, 10] указывается, что при решении подобных задач применяются подходы, основанные на решении задачи покрытия (*Coverage Problem*) и адаптивной стратегии изменения частоты опроса (*Adaptive Sampling*). Несмотря на то, что данные исследования чаще рассматривают классические *WSN*, изложенные там идеи релевантны для сетей специального назначения, где набор *SNMP*-агентов с соответствующими *OID* фактически выступает в роли аналогов сенсорных узлов.

Задача покрытия нацелена на поиск минимального множества датчиков  $\Theta^* \subseteq \Theta$  из доступного полного набора  $\Theta$ , при котором совокупный вклад в полезную полноту  $U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)$  не меньше  $U_{\min}$ . При этом учитывается, что у каждого датчика есть собственная «стоимость» в виде объема данных, формируемых при опросе, что влияет на загруженность канала и время обработки. Решение, как правило, строится на «жадных» (*greedy*) алгоритмах: на каждом шаге выбирается датчик, дающий наибольший прирост полезной полноты относительно стоимости, и так далее, пока  $U_{\text{эфф}}(\varepsilon, \tau)$  не достигнет  $U_{\min}$ . Такой принцип позволяет сократить избыточный набор датчиков и снизить вероятность перегрузки сети.

Кроме определения необходимой полноты и множества датчиков, важно также определить частоту опроса. В условиях стационарных сетей обычно задают постоянные интервалы опроса, достаточные для стандартной диагностики. Однако в динамической обстановке, когда уровень помех или интенсивность использования канала может резко возрасти, либо появиться сбой в энергоснабжении, требуется адаптивная страте-

гия. Она предполагает увеличение частоты опроса в периоды, когда оборудование находится в зоне риска (перегрев, высокий уровень битовых ошибок, перегрузка канала), и снижение частоты при благоприятной обстановке. Это позволяет, с одной стороны, своевременно выявлять любые опасные тенденции, а с другой — не тратить лишней трафик и вычислительные ресурсы в спокойных режимах. Формализовать вклад отдельных датчиков в общее значение  $U_{эфф}(\epsilon, \tau, \{f_j\})$  можно введением частот  $\{f_j\}$ , учитывающих качество и актуальность данных.

При реализации адаптивного подхода менеджер должен иметь инструменты оперативной смены как состава отслеживаемых параметров, так и частоты их опроса. Здесь в игру вступает расширенный протокол *SNMP*, в котором появятся новые *OID*, отвечающие за глубину детализации (*oidDetailLevel*) и частоту опроса (*oidSamplingFreq*). В формализованном виде итоговую эффективную полноту можно представить следующим образом:

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

где  $U_j$  — базовая полнота данных от  $j$ -го датчика (или параметра), а  $w_j$  — весовой коэффициент, зависящий не только от уровня управления и информационного профиля, но и от

фактической частоты опроса  $\{f_j\}$ . Возрастание  $\{f_j\}$  позволяет собирать более детализированные данные за единицу времени, но увеличивает нагрузку на канал и может способствовать росту пропускных задержек. Правильно выстроенная оптимизационная задача выбирает такое множество датчиков  $\Theta^*$  и такие частоты  $\{f_j\}$ , которые обеспечивают  $U_{эфф}(\epsilon, \tau, \{f_j\}) \geq U_{мин}$  при минимизации нагрузки на сеть, времени сбора информации и риска ее перехвата.

**Решение поставленной задачи и результаты исследования**

Предлагаемая концепция модернизации *SNMP* реализует гибкое управление глубиной мониторинга и частотой опроса ТКО, что особенно актуально в полевых узлах связи с ограниченным ресурсом пропускной способности каналов связи. Ключевым элементом является дополнение *MIB* новыми *OID*, такими как *oidDetailLevel* (управление уровнем детализации) и *oidSamplingFreq* (динамическая настройка частоты опроса). На рисунке 1 демонстрируется базовая архитектура: менеджер (Server) взаимодействует с несколькими *SNMP*-агентами, а также с интеллектуальным блоком *ML*, который анализирует телеметрию (например, показатели помех, состояние питания) и формирует рекомендации по оптимальным значениям новых *OID*.

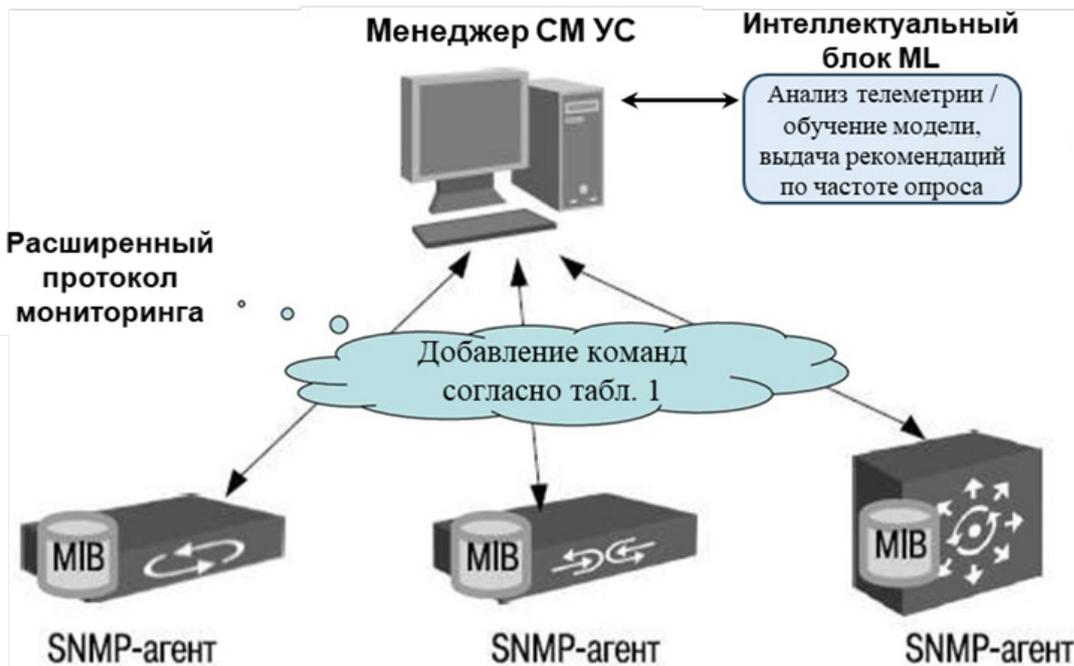


Рис. 1. Предлагаемая система управления мониторингом технического состояния ТКО с использованием модернизированного протокола

В таблице 1 приведены существующие команды (*Get*, *Set*, *GetNext*), а также новые команды (*oidDetailLevel*, *oidSamplingFreq*) для направления *Server* → *Agent*. Аналогичные изменения затрагивают и направление *Agent* → *Server*, где наряду с классическими *Trap* и *Inform*-сообщениями появляются дополнительные уведомления (*TrapExcessiveBER*, *TrapTempWarning*), позволя-

ющие информировать менеджера о критических состояниях с необходимым уровнем детализации. Так, при низком уровне детализации агент может передавать лишь сигнальные уведомления, а при повышенной детализации — отправлять более обширные сведения о причинах сбоев и динамике параметров (включая время фиксации, историю журналов и т. д.).

Таблица 1

Расширение команд «менеджер – агент» в SNMP

Команды менеджера (Server → Agent)	Сообщения агента (Agent → Server)
<p><b>Существующие:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Get</b> – запрос значения (чтение параметра)</li> <li>- <b>Set</b> – установка значения параметра</li> <li>- <b>GetNext</b> — последовательное чтение следующего объекта MIB</li> </ul>	<p><b>Существующие:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Trap</b> – аварийное (асинхронное) уведомление без подтверждения от сервера</li> <li>- <b>Inform</b> – уведомление с подтверждением от сервера</li> </ul>
<p><b>Новые:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>oidDetailLevel</b> – настройка уровня детализации параметров</li> <li>- <b>oidSamplingFreq</b> – настройка частоты опроса параметров</li> </ul> <p><i>Фактически это новые OID в MIB для динамического управления глубиной детализации и частотой опроса.</i></p>	<p><b>Новые:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Дополнительные Trap/Inform (например, <b>TrapExcessiveBER</b>, <b>TrapTempWarning</b>) – позволяют агенту сообщать более подробную или менее детализированную информацию о состоянии оборудования в зависимости от настроек</li> </ul> <p><i>Включают расширенный набор полей (OID) для передачи дополнительных сведений.</i></p>

Расширенный протокол мониторинга базируется на восьми этапах (рис. 2), которые позволяют систематизировать процесс разработки и внедрения модернизированного протокола мониторинга ТКО на узлах связи специального назначения.



Рис. 2. Алгоритм разработки и внедрения расширенного протокола SNMP

Рассмотрим каждый шаг алгоритма:  
1. Определение требований к мониторингу. Изучаются факторы, влияющие на надежность ТКО (риск деструктивных воздействий). На основе этого задается минимально необходимая полнота данных  $U_{min}$  и временные ограничения сбора измерительной информации и диагностики объектов мониторинга.

2. Анализ существующей MIB. Выполняется оценка текущих объектов (OID), поддерживаемых в узлах связи. Определяется набор недостающих переменных (например, показатели температуры, BER, состояние блоков питания), а также необходимость динамического управления их опросом. Формализация эффективности мониторинга может быть выражена суммой значимостей данных  $U_j$  с учетом весовых коэффициентов  $w_j$ .

3. Формирование новых OID и Trap-сообщений. Разрабатываются *oidDetailLevel* и *oidSamplingFreq*, а также дополнительные Trap-сигналы (*TrapExcessiveBER*, *TrapTempWarning*) для уведомления о перегревах, всплесках битовых ошибок и др. Критерием полноты выступает  $U_{эфф} \geq U_{min}$ , что гарантирует достаточный набор данных для диагностики.

4. Внесение изменений в агенты. SNMP-агенты дополняются реализацией новых OID: поддерживаются механизмы «Set» для *oidDetailLevel* и *oidSamplingFreq*, а также обработчики новых Trap-сообщений (*TrapHandlers*). В программном

обеспечении агентов учитываются формулы расчета нагрузки на канал ( $\Lambda_j = W_j \times f_j$ ), чтобы избежать перегрузок.

5. Внесение изменений на менеджере. Управляющая станция (менеджер) получает возможность изменять параметры глубины детализации и частоты опроса по протоколу *SNMP* (команды из таблицы 1). Дополнительно интегрируется блок *ML*, который, анализируя получаемые *Trap/Inform*-уведомления, способен на лету корректировать политику опроса. Благодаря этому в периоды спокойной обстановки детальность снижается (не перегружая канал), а при обнаружении признаков опасных сбоев (например, берущихся из *TrapExcessiveBER*) повышается частота и глубина мониторинга.

6. Тестирование и оценка нагрузки. На опытных стендах моделируются различные сценарии (резкие изменения внешней температуры, скачки напряжения, помехи). Проверяется, что система корректно переключается между низкой и высокой детальностью, а итоговая нагрузка на канал удовлетворяет неравенству  $T_{сб} \leq T_{сб}^{доп}$ .

7. Внедрение в опытную эксплуатацию и корректировка. Расширенная система развертывается в реальной (или приближенной к реальной) среде. На основании полученных данных корректируются отдельные пороги, значения  $\alpha$  в выражении (4) и параметры обучения блока *ML*, обеспечивая оптимальную реакцию на сбой.

8. Вывод результатов (готовое решение).

Завершающий этап предполагает формирование полностью работоспособного варианта «менеджер–агент» с новыми *OID* и *Trap*-сообщениями. Такая модернизация *SNMP* обеспечивает адаптивное управление мониторингом, сокращает  $\Delta T_{диагн}$ , улучшает скрытность за счет снижения избыточного трафика<sup>4</sup> в нормальном режиме и позволяет в случае угроз быстро активировать режим детального сбора данных.

В условиях боевых действий и прочих критических ситуаций возможность вариативного контроля глубины диагностики и частоты опроса является ключом к эффективной эксплуатации узлов связи. Благодаря интеллектуальному блоку *ML* и расширенным *Trap*-сообщениям система способна мгновенно реагировать на штатные события, сводя к минимуму риск отказа ТКО и обеспечивая непрерывность управления. Такой подход во многом определяет результативность

операции и пригоден как для стационарных сетей с повышенными требованиями к надежности, так и для высокодинамичных полевых условий.

Предлагаемый подход к модернизации *SNMP*, может позволить динамически управлять глубиной и частотой мониторинга ТКО в полевых условиях, демонстрирует при этом высокую работоспособность и эффективность. Реализованная архитектура (расширенная *MIB*, новые *OID*, дополнительные *Trap*-сообщения и интеллектуальный блок) способны удовлетворить поставленным требованиям, обеспечивая достаточную полноту данных при минимальном риске перегрузки сети.

Практический пример расчёта трафика мониторинга в условиях ограниченной пропускной способности канала

Рассмотрим пример расчёта нагрузки на спутниковый канал пропускной способностью 2 Мбит/с (2048 Кбит/с), отражающий типичные условия эксплуатации сетей специального назначения при ограниченном ресурсе спутниковой связи в ходе ведения, например, наступательной операции. Данные каналы, как правило, одновременно обслуживают телеметрический трафик, каналы управления, а также голосовую и прикладную информацию, что существенно повышает требования к оптимизации объёма служебной нагрузки. Даже сравнительно небольшое по абсолютной величине количество мониторинговых сообщений способно вызвать избыточную загрузку, особенно при наличии криптографических накладных расходов и высокой задержки (*RTT*) характерной для спутниковых систем связи.

Приведённые ниже расчёты наглядно демонстрируют, каким образом предложенный подход к адаптивному управлению глубиной детализации и частотой опроса может повысить эффективность использования канала и сократить риск деградации критически важного трафика.

Исходные данные:

*Полоса пропускания канала спутниковой связи:*

2 Мбит/с  $\approx$  250 Кбайт/с.

*При круглосуточной работе суммарная суточная пропускная способность без учёта накладных расходов протоколов и потерь пакетов может достигать:*

250 Кбайт/с  $\times$  3600  $\times$  24  $\approx$  21,6 Гбайт в сутки.

*Конфигурация сети:*

Наблюдаемая телекоммуникационная система содержит 20 объектов мониторинга (маршрутизаторы, коммутаторы, мультиплексоры и т. п.), каждый с 50 ключевыми параметрами (*OID*) для мониторинга.

В классическом подходе (стандартный

<sup>4</sup>Нефедов, В. И. Общая теория связи: учебник для вузов / В. И. Нефедов, А. С. Сигов; 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: 03.02.2025).

*SNMP*) все параметры опрашиваются с равными интервалами, без учёта текущих условий.

*Размер SNMP-сообщений:*

Один запрос (*Get*) на 1 *OID* — около 200–400 байт (включая *IP/UDP/SNMP* заголовки и полезную нагрузку).

Типичный ответ (*Response*) — 300–500 байт.

При использовании *SNMPv3* с аутентификацией и шифрованием объём может вырасти ещё на 20–30%.

*Временная задержка (latency) для геостационарного спутника:* 500–600 мс в одну сторону (*RTT*  $\approx$  1–1,2 с). В условиях ведения операции задержки могут быть ещё интенсивнее, а потери пакетов — выше.

**Сценарий 1.** Стандартный *SNMP* (без адаптивных механизмов).

Частота опроса — опрос всех 50 *OID* на каждом из 20 объектов мониторинга каждые 5 секунд.

Объём данных на один полный цикл:

Запрос на 50 *OID* (20 устройств) =  $50 \times 20 = 1000$  запросов, каждый запрос  $\sim$  300 байт  $\Rightarrow \Rightarrow 1000 \times 300 = 300000$  байт или  $\approx$  300 Кбайт только на запросы.

Ответы по 400 байт  $\Rightarrow 1000 \times 400 = 400000$  байт или  $\approx$  400 Кбайт.

Итого на один 5-секундный цикл приходится  $\sim$ 700 Кбайт.

Нагрузка в секунду: 700 Кбайт / 5 с = 140 Кбайт/с  $\approx$  1,12 Мбит/с.

Процент загрузки 2-Мбит/с канала: около 56%.

В течение суток:  $(700 \text{ Кбайт} / 5 \text{ с}) \times 17280$  пятисекундных интервалов в сутках  $\approx$  12,1 Гбайт (Без учёта возможных повторных запросов при потерях пакетов и накладных расходов криптографической защиты).

Как показывают представленные расчёты, при использовании стандартной схемы интенсивного опроса в сравнительно крупной сети для одного низкоскоростного канала (20 объектов мониторинга с 50 контролируемыми параметрами и короткими интервалами опроса) формируемый служебный трафик может существенным образом исчерпать доступную полосу пропускания, оставляя недостаточно ресурсов для приоритетной передачи оперативной информации предназначения канала.

**Сценарий 2.** Расширенный *SNMP* с динамической детализацией и частотой опроса.

В этом варианте используется механизм адаптивной перестройки:

1. Базовый режим «*Base (LOW)*».

Частота опроса — один раз в 5 минут

(300 секунд).

Опрашиваются 10 необходимых из 50 возможных *OID* на каждом объекте мониторинга, наиболее критичные (например, состояние питания, ошибка канала, суммарный уровень *BER*).

Таким образом, за цикл (300 секунд) при 20 объектах мониторинга опрашивается  $20 \times 10 = 200$  *OID*. Если в среднем 300 байт на запрос и 400 байт на ответ, то можно получить:  $200 \times (300 + 400) = 200 \times 700 = 140,000$  байт  $\approx$  140 Кбайт за 300 секунд.

Среднее в секунду — 140 Кбайт / 300 с  $\approx$  0,47 Кбайт/с  $\approx$  3,76 Кбит/с. Это составляет  $\approx$  0,19% от пропускной способности канала в 2 Мбит/с.

Подобный режим действует при отсутствии признаков аварий или критических событий. Трафик в сутки — 140 Кбайт  $\times$  86400 с  $\approx$  40,3 Мбайт.

2. Углублённый режим «*HIGH*».

Активируется при поступлении тревожных *Trap*-сообщений (*TrapExcessiveBER*, *TrapTempWarning*) или при превышении пороговых значений по критическим *OID*.

В этом случае менеджер может установить частоту опроса 1 раз в 10 секунд для 20–25 необходимых *OID* (более детальный набор). Размер *SNMP*-сообщений также может возрасти за счёт передачи расширенной диагностической информации (например, 400–500 байт на запрос, 500–600 байт на ответ).

Предполагается, что аварийный режим длится 2 часа в сутки. За этот период опрашивается  $\approx$  25 *OID* на 20 устройствах каждые 10 секунд —  $20 \times 25 = 500$  *OID* за цикл.

Если суммарный объём запроса и ответа на один *OID* составляет  $\sim$ 1000 байт, то за 10 с формируется около 500 Кбайт данных (или 50 Кбайт/с = 400 кбит/с). Это соответствует примерно 20 % загрузки 2 Мбит/с канала в течение данного интервала.

За 2 часа (7200 с) генерируется  $\approx$   $(500 \text{ Кбайт} / 10\text{с}) \times 720 = 360000$  Кбайт = 360 Мбайт.

Итоговая суточная нагрузка:

- 22 часа в базовом режиме (*LOW*) —  $22 \times (40,3 / 24) \approx 36,9$  Мбайт.
- 2 часа в режиме (*HIGH*) — 360 Мбайт.
- Итого  $\approx$  397 Мбайт за сутки, что существенно ниже 12,1 Гбайт, получающихся при классическом сценарии (рис. 3). Кроме того, высокая интенсивность («*HIGH*») действует только в течение ограниченного двухчасового интервала, позволяя большую часть времени сохранять минимальную нагрузку.

Проведённые расчёты показывают, что в

случае классической реализации *SNMP* с фиксированной частотой и максимальным набором *OID* даже относительно небольшое увеличение числа объектов может привести к значительному росту нагрузки на канал (достигая 50–60 % пропускной способности при 2 Мбит/с). Вместе с тем, предлагаемый адаптивный механизм позволяет оптимизировать объём мониторингового трафика в периоды нормальной эксплуатации и автоматически повышать детальность опроса при

обнаружении потенциальных отказов. Это высвобождает резерв пропускной способности канала для передачи оперативных сообщений и критически важных команд в телекоммуникационных системах специального назначения. Приведённый пример демонстрирует, что динамическое управление глубиной детализации и частотой опроса снижает совокупную нагрузку без ущерба для эффективности диагностики при возникновении сбоев, аномалий и отказов.

### Суточный трафик, Мбайт

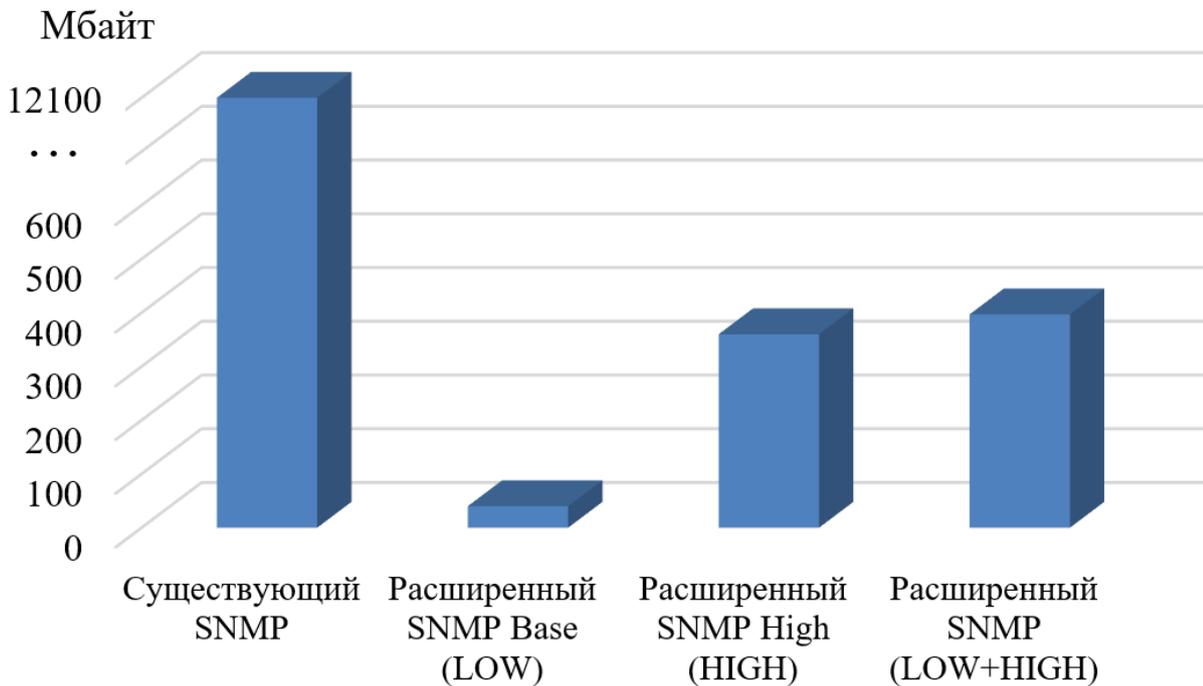


Рис. 3. Сравнение суточного трафика мониторинга (2 Мбит/с)

#### Выводы

Подход к модернизации протокола *SNMP* ориентирован на решение задач обеспечения надежного, скрытного и оперативного мониторинга узлов связи специального назначения, действующих в условиях ограниченной полосы пропускания, переменной помеховой нагрузки и риска целенаправленного подавления связи. В отличие от классической схемы *SNMP*, где механизмы мониторинга статичны, предложенное расширение *MIB* и новые типы команд (*oidDetailLevel* и *oidSamplingFreq*) дают возможность динамически управлять глубиной детализации и частотой опроса данных. Формируемая архитектура «менеджер–агент» становится более гибкой: агент способен переходить от упрощенного к детализированному режиму в режиме реального времени,

а менеджер может централизованно задавать эти переключения в зависимости от конкретной обстановки. Дополнительные типы *Trap/Inform*-сообщений позволяют пересылать более полные сведения о сбоях, когда это необходимо, не перегружая при этом канал постоянным транзитом большого объема диагностических данных.

Адаптивность достигается благодаря использованию модели эффективной полноты информации, в которой учитывается не только объем собираемых параметров, но и их критичность для конкретного уровня управления. Расширенный *SNMP*, тем самым, способен поддерживать оптимальный баланс между избыточностью трафика в спокойное время и достаточной полнотой данных для быстрой диагностики в моменты критических сбоев. На уровне формальных методов

это реализуется путем решения задач покрытия, снижающих избыточность набора датчиков, и адаптивного выбора частот опроса, сокращающего излишнюю загрузку канала и ускоряющего анализ в важные периоды. Результатом становится уменьшение  $\Delta T_{\text{диагн}}$ , приводящее к более быстрому восстановлению сети при отказах и снижению общей уязвимости системы управления.

Предложенная концепция реализации расширенного *SNMP* соответствует растущим требованиям к безопасности и эффективности военных систем связи. Экономия ресурсов в спокойном режиме и возможность оперативного наращивания полноты мониторинга при выявленных угрозах существенно повышают живучесть и скрытность сети. Испытания такой

системы в реальных условиях ведения боевых действий должны подтвердить ее способность гибко реагировать на комплекс внешних факторов, включая возможные сбои в питании, климатические воздействия и враждебные радиоэлектронные атаки. В перспективе данный подход может быть интегрирован не только в военные сети, но и в другие типы систем, где присутствуют повышенные требования к адаптивности, скорости реакции и экономии ресурса канала передачи данных. Все это делает предложенное решение актуальным и востребованным в условиях современных операций, требующих надежного функционирования телекоммуникационной инфраструктуры при одновременно ограниченных и подверженных противодействию ресурсах.

### Литература

1. Блинова, О. В. Проектирование сетей связи быстрого развертывания с использованием программного приложения анализа конфигурации сети / О. В. Блинова, С. В. Васьковкий, Я. В. Рыков // Управление большими системами: сборник трудов. – 2021. – № 90. – С. 121–138. – DOI: 10.25728/ubs.2021.90.6
2. Боговик, А. В. Проблемы организации мониторинга телекоммуникационного оборудования узлов связи пунктов управления оперативного объединения и пути их решения / А. В. Боговик, Д. М. Сафиулов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 196–198. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-196-197
3. Мансуров, Т. А. Мониторинг устройств по технологии SNMP, находящихся в сети / Т. А. Мансуров, В. Е. Марлей, С. Ю. Соклакова // Информационные системы и технологии. – 2021. – № 5(127). – С. 91–95. – EDN AYELWE
4. Боговик, А. В. Анализ существующих систем мониторинга технического состояния телекоммуникационного оборудования сетей связи / А. В. Боговик, Д. М. Сафиулов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 112–117. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-112-113
5. Чикин, А. В. Достаточные статистики в задаче мониторинга спутниковых каналов TDMA / А. В. Чикин // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2009. – № 3. – С. 108–119. – EDN KYNLND
6. Перунов, Ю. М. Радиоэлектронная борьба в информационных каналах: монография / Ю. М. Перунов, А. И. Куприянов. Москва — Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 452 с. - ISBN 978-5-9729-0718-2.
7. Боговик, А. В. Методологический подход к формированию архитектуры системы мониторинга технического состояния техники связи / А. В. Боговик, Д. М. Сафиулов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 176–182. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-176-177
8. Боговик, А. В. Предложения по повышению эффективности технического диагностирования типовых элементов замены телекоммуникационного оборудования / А. В. Боговик, А. А. Бурлаков, Д. М. Сафиулов // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Материалы VIII межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2023. – С. 60–65. – EDN HBUNRJ
9. Эрзин А. И. Модели и методы оптимизации беспроводных сенсорных сетей // – Труды Международной конференции по информационным наукам и технологиям связи. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 1–5. – EDN HLLHRU
10. Мальцева, Н. С. Анализ способов построения беспроводных сенсорных сетей / Н. С. Мальцева, А. Д. Зубова, И. Н. Марышева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2018. – № 2(24). – С. 31–36. – EDN ZLWNMU

# PROPOSALS FOR MODERNIZATION OF THE PROTOCOL FOR MONITORING TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT OF A SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION CENTER

Bogovik A.V.<sup>1</sup>, Safiulov D.M.<sup>2</sup>

**Keywords:** remote diagnostics, adaptive data collection, hierarchical structures of MIB (Management Information Base), field conditions, electronic countermeasures, channel reliability, intelligent configuration, flexible detailing

## Abstract

**The purpose of** the article is to analyze the existing methods of collecting and processing data on the state of telecommunications equipment of special-purpose communication networks and to develop proposals for the implementation of remote adaptive diagnostics, taking into account the features of field conditions and high requirements for secrecy.

**The research methods** consist in the use of comparative analysis mechanisms in the process of managing network devices, formalized models of information completeness and algorithms of the required coverage to optimize the structure of the set of sensors used. The methodological basis was the work on improving the stability of sensor networks in the face of limited resources, modeling and expert evaluation, which made it possible to identify key performance indicators proposed approach.

**Results of** the study. In the course of the work, the problems arising during the operation of communication nodes in conditions of limited channel bandwidth and high risk of electronic countermeasures are analyzed. It is shown that the standard mechanism of remote monitoring, which provides for constant detail and uniform polling frequency, in a combat situation leads to an excessive amount of service traffic and can unmask important elements of the infrastructure. The strategy allows you to dynamically change the depth of diagnostics and data acquisition intervals, avoiding overloading network resources. This is achieved by adding new identifiers and trap messages to the MIB parameter library, which are activated only when threats or deviations from normal operating modes are detected. The proposed approach significantly reduces the time to detect malfunctions, increases the speed of their elimination and reduces the risk of losing critical information, which is extremely important for field military systems and associated communication centers. In addition, adaptive polling rate algorithms are considered in detail, which reduce the load during periods of stable operation and immediately increase the sensitivity of monitoring in the event of abnormal situations. This flexibility provides both effective diagnostics and the necessary level of stealth.

**The scientific novelty of the** work lies in the proposal of formal models based on the effective completeness of data and coverage tasks, which make it possible to quantitatively substantiate the choice of monitoring depth and survey frequency. The introduction of new identifiers and messages in the MIB opens up additional opportunities for intelligent reconfiguration of monitoring agents, taking into account the dynamics of the situation and limited channel resources.

## References

1. Blinova, O. V. Proektirovanie setej svjazi bystrogo razvertyvaniya s ispol'zovaniem programmnoho prilozhenija analiza konfiguracii seti / O. V. Blinova, S. V. Vas'kovkij, Ja. V. Rykov // Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov. – 2021. – № 90. – S. 121–138. – DOI: 10.25728/ubs.2021.90.6
2. Bogovik, A. V. Problemy organizacii monitoringa telekommunikacionnogo oborudovanija uzlov svjazi punktov upravlenija operativnogo ob#edinenija i puti ih reshenija / A. V. Bogovik, D. M. Safiulov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki. – 2024. – № 5. – S. 196–198. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-196-197
3. Mansurov, T. A. Monitoring ustrojstv po tehnologii SNMP, nahodjashhihsja v seti / T. A. Mansurov, V. E. Marlej, S. Ju. Soklakova // Informacionnye sistemy i tehnologii. – 2021. – № 5(127). – S. 91–95. – EDN AYELWE
4. Bogovik, A. V. Analiz sushhestvujushhih sistem monitoringa tehniceskogo sostojanija telekommunikacionnogo oborudovanija setej svjazi / A. V. Bogovik, D. M. Safiulov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki. – 2023. – № 5. – S. 112–117. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-112-113
5. Chikin, A. V. Dostatochnye statistiki v zadache monitoringa sputnikovyh kanalov TDMA / A. V. Chikin // Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio. – 2009. – № 3. – S. 108–119. – EDN: KYNLND
6. Perunov, Ju. M. Radiojelektronnaja bor'ba v informacionnyh kanalakh: monografija / Ju. M. Perunov, A. I. Kuprijanov. Moskva – Vologda: Infra-Inzhenerija. 2021. 452 s. ISBN 978-5-9729-0718-2.

<sup>1</sup>Alexander V. Bogovik, Ph.D., Professor, Professor of the Department of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: bogovikav@mail.ru

<sup>2</sup>Davlet M. Safiulov, Adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: davletzas@mail.ru

7. Bogovik, A. V. Metodologičeskij podhod k formirovaniju arhitektury sistemy monitoringa tehničeskogo sostojanija tehniki svjazi / A. V. Bogovik, D. M. Safiulov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehničeskie nauki. – 2024. – № 2. – S. 176–182. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-176-177
8. Bogovik, A. V. Predložhenija po povyšheniju jeffektivnosti tehničeskogo diagnostirovanija tipovyh jelementov zameny telekommunikacionnogo oborudovanija / A. V. Bogovik, A. A. Burlakov, D. M. Safiulov // Problemy tehničeskogo obespečenija vojsk v sovremennyh uslovijah: Materialy VIII mezhvuzovskoj nauchno-praktičeskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 14 aprelja 2023 goda. – Sankt-Peterburg: Voennaja akademija svjazi, 2023. – S. 60–65. – EDN: HBUNRJ
9. Jerzin A. I. Modeli i metody optimizacii besprovodnyh sensoryh setej // – Trudy Mezhdunarodnoj konferencii po informacionnym naukam i tehnologijam svjazi. – 2018. – T. 1, № 1. – S. 1–5. – EDN: HLLHRU
10. Mal'ceva, N. S. Analiz sposobov postroenija besprovodnyh sensoryh setej / N. S. Mal'ceva, A. D. Zubova, I. N. Marysheva // Inženerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija. – 2018. – № 2(24). – S. 31–36. – EDN: ZLWNMU



# ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ СВЯЗНОСТИ СЕТЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Якушенко С.А.<sup>1</sup>, Шевяков В.Д.<sup>2</sup>, Садовников В.Е.<sup>3</sup>, Гладких Д.С.<sup>4</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2-65-73

**Ключевые слова:** радиотехнические сети передачи информации, устойчивость сети, живучесть сети, сетевой граф, равновесное состояние, формула Бернулли, устойчивость сети.

## Аннотация

**Цель работы:** на основе анализа и обобщения структурных свойств сетевых графов данных разработать методологический подход к оценке структурной связности интегрированных радиотехнических систем с вероятностным характером межузловых связей.

**Метод исследования:** метод исследования сочетает в себе комплексное сочетание модели Бернулли и имитационного моделирования на основе программной платформы MATLAB для вычисления вероятностей успешного соединения между узлами радиотехнической сети передачи информации. Этот подход позволяет учитывать фактор неопределенности и многоаспектность процессов при моделировании структурной связности. Важным аспектом является наличие равновесных вероятностей связи между всеми узлами сети, что позволяет применять вероятностную модель Бернулли для вычисления структурной связности вершин сетевого графа.

**Результаты исследования:** результаты позволяют оценивать структурную связность радиотехнических сетей в динамике изменения вероятностных межузловых связей, а также сформулировать научно обоснованные требования к структурным параметрам сети, таким как количество узлов, ветвей и межузловых связей для успешного функционирования сети в условиях воздействия внешних деструктивных факторов. Эти аспекты будут положены в основу дальнейшего развития алгоритмов и методов анализа и оценки свойств сетей связи военного назначения.

**Научная новизна:** впервые применена вероятностная модель Бернулли в сочетании с имитационным моделированием в программной среде MATLAB для количественной оценки и сравнительного анализа структурной связности радиотехнических сетей передачи информации, что позволяет осуществить моделирование различных ситуаций вероятностного характера, возникающих при деструктивных внешних воздействиях. В работе представлен формализованный подход к расчету структурной связности, учитывающий степень влияния и вклад структурных параметров в общую оценку устойчивости радиотехнических сетей.

**Вклад:** Якушенко С. А. – общая концепция предложенного подхода моделирования вероятностных ситуаций и расчета структурной связности; Шевяков В. Д. и Садовников В. Е. – программная реализация предложенного метода и проведение эксперимента; Гладких Д. С. Шевяков В. Д. – обсуждение особенностей реализации подхода.

## Введение

В современном мире, где информационные технологии и средства связи играют первостепенную роль в тактике ведения военных действий, важность интегрированных радиотехнических систем, осуществляющих добычу, хранение, обработку и доведение информации до должностных лиц становится очевидной. Интеграция является критически важным фактором,

обеспечивающим оперативное реагирование на изменения обстановки и эффективное функционирование систем управления. Современные вооруженные конфликты характеризуются быстротой принятия решений и необходимостью мгновенного обмена информацией в условиях внешних деструктивных воздействий [1,2]. Поэтому важным свойством радиотехнических систем является устойчивость функционирования сети

<sup>1</sup>Якушенко Сергей Алексеевич, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: was16@mail.ru

<sup>2</sup>Шевяков Владислав Денисович, младший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: Vlad89312239540.la@yandex.ru

<sup>3</sup>Садовников Владимир Евгеньевич, младший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: bladimir1998@mail.ru

<sup>4</sup>Гладких Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: mr.zid2004@mail.ru

и способность ее адаптации к изменяющимся условиям обстановки. Моделирование и оценка свойств устойчивости радиотехнических систем и его составляющих в условиях современного вооруженного противоборства является комплексной и многогранной задачей, требующей всестороннего анализа и глубокого понимания специфики современных военных конфликтов.

Современные сети связи представляют собой сложную систему, включающую оконечное оборудование, узлы связи (УС), коммутационные и информационные центры, линии связи, соединяющие между собой элементы сети и др. [3,4]. В настоящее время активно создаются и внедряются многоуровневые, иерархические сети связи различных ведомств. Кроме того, реализуется концепция создания единой инфокоммуникационной платформы. Следовательно, тенденции к интеграции систем и единению платформ с одной стороны усложняют радиотехнические сети передачи информации, а с другой требуют устойчивого их функционирования в условиях воздействия деструктивных факторов.

Для обоснования устойчивости функционирования проектируемых сетей применяется множество методов ее оценки. В основном оценка проводится на основе структур сетей, что позволяет использовать их результаты при разработке современных радиотехнических систем. Ключевой характеристикой таких сетей являются структурная связность, которая характеризует среднее количество связей между узлами сети [5,6]. Связность сети косвенно определяет ее живучесть, т.е. способность сети сохранять свою работоспособность при воздействии внешних деструктивных факторов.

В статье [7] рассматривается метод расчета структурной надежности сетей связи на основе данных мониторинга. В отличие от предыдущего примера, здесь предлагается алгоритм вычисления математического ожидания числа связей в сети, используя коэффициент готовности, интенсивность отказов и вероятность связности. Математические модели и программная реализация позволяют анализировать зависимость показателей надежности от различных параметров, таких как интенсивность отказов и простоя. Эти методы обеспечивают точную оценку надежности сети, но требуют значительных вычислительных ресурсов и сложных моделей для анализа.

Таким образом оценка структурной связности сложных радиотехнической систем является важным параметром живучести, а следовательно, устойчивости сети и в современных условиях создания и проектирования новых интегрированных радиотехнических систем является

актуальным направлением исследования. Поэтому **целью работы является** анализ структурных свойств сетевых графов и разработка научного подхода к оценке структурной связности интегрированных радиотехнических систем. Этому вопросу и посвящена данная статья.

### **Анализ предмета исследования и постановка задачи**

Анализ существующих способов оценки структурной связности показывает, что она основана на определении среднего количества связей от узлов сети. Основным их недостатком является, то, что они не учитывают степень связи между узлами, т.е. насколько эти связи надежны и как изменяется структурная связность при изменении надежности связи между узлами сети.

Основополагающей частью работы является математическая модель оценки структурной связности сложных систем с неустойчивыми связями [8]. В данной статье предложена математическая модель оценки структурной связности сложных систем, которая учитывала влияние деструктивных факторов на надежность связей между элементами систем. Особенностью модели является учет вероятностного характера взаимосвязей.

В условиях воздействия деструктивных факторов на элементы радиотехнической сети надежность межузловых линий и узлов не является абсолютной: отказы могут происходить как из-за аппаратных сбоев, так и под воздействием внешних негативных факторов. Поэтому каждый компонент сети оценивается вероятностью его нормального (требуемого) функционирования. Физически это означает вероятность того, насколько стабильно данный компонент выполняет свои функции. Вероятностная мера надежности может выражаться как вероятность безотказной работы за определенный период времени или другими показателями имеющие иной физический смысл.

Использование равновесных вероятностей между узлами позволило применить модель Бернулли, что значительно упростило процесс вычислений и повысило оперативность оценки структурной связности. Это стало возможным благодаря тому, что наш подход позволяет рассчитывать вероятность успешной связи сети, где каждое соединение имеет равновесную вероятность успеха или неудачи. Формула Бернулли используется для вычисления вероятности успешного исхода в серии независимых испытаний (биномиальных экспериментов), где каждый исход имеет два возможных результата: успех или неудача [9]. Такой метод обеспечивает возмож-

ность отслеживания структурной связности в реальном времени и предоставляет более простой и эффективный инструмент для анализа сети. Поэтому в работе рассматривается обобщенное понятие структурной связности, как взаимосвязи между узлами коммутации, образующие полное и равновесное состояние структуры сети.

Такой подход расчета структурной связности обусловлен необходимостью оперативного восстановления линий связи в случае их разрушения на критических участках графа связующей системы, вызванного деструктивным воздействием извне или сбоями внутри архитектуры [10,11]. Данный способ позволяет не только вычислить структурную связность, т.е. живучесть сети, но и оценить устойчивость восстановленных линий связи и вероятность успешной передачи информационных пакетов. Кроме того, анализ структурной связности помогает выявлять уязвимости места сети, прогнозировать поведение системы при различных сценариях внешних воздействий и разрабатывать эффективные методы её модернизации [12,13]. Таким образом, модель является многофункциональной определяющей структурную связность, надежность, устойчивость и работоспособность сложных сетевых систем в зависимости от физического смысла показателя модели.

На платформе MATLAB был разработан программный код, который позволяет рассчитывать структурную связность сети для заданного числа узлов связи  $n$  и различных значений  $k$ , представляющих минимальное количество узлов, с которыми должна быть установлена связь. Программа также вычисляет среднее количество связей для всех узлов, которое меньше или больше определенного значения  $m$ . Итоговый результат представляет собой график зависимости структурной связности от параметров системы, что обеспечивает наглядность и удобство анализа.

Таким образом, в работе предложен научный подход к анализу структурной связности сетей связи с использованием модели Бернулли и имитационного моделирования в программной среде MATLAB. Этот подход позволяет упростить расчеты и повысить оперативность оценки структурной связности в условиях равновесных вероятностей между узлами сети.

В рамках данной работы анализируется вычисление структурной связности для полностью связной и равновесной сети. В таких условиях применима формула Бернулли, поскольку вероятности связи между узлами графа считаем равными, а каждый элемент системы связан с другими.

Формула Бернулли используется для вычисления вероятности успешного исхода в серии независимых испытаний (биномиальных экспериментов), где каждый исход имеет два возможных результата: успех или неудача<sup>5</sup>:

$$p(k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$$

где  $n$  — общее количество испытаний;  $k$  — количество успешных исходов в испытаниях;  $p$  — вероятность успеха (наличие связи) в каждом испытании;  $C_n^k$  — биномиальный коэффициент, определяющий число сочетаний связей между вершинами сетевого графа (рз  $n$  возможных по  $k$ )

Биномиальный коэффициент можно вычислить по формуле:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Представленная математическая модель (2) позволяет вычислить вероятность того, что из  $n$  независимых испытаний будет ровно  $k$  успешных исходов при вероятности успеха  $p$  в каждом испытании, т.е. определить число сочетаний связей от каждой вершины графа в отдельности. Для определения среднего значения связности сетевого будем использовать ее усредненное значение, тогда формализованную постановку задачи можно записать в следующем виде:

$$C_k(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k},$$

Ограничения и условия:  $p = 0, \dots, 1, n > 0, 0 < k < n$ .

Полученная математическая модель (3) позволяет вычислить усредненное значение связности если известна структура сетевого графа и вероятностные значения ребер графа.

### Анализ структурной связности

Анализ структурной связности сетей связи основан на использовании модели Бернулли, что позволяет упростить расчеты в силу простоты модели, а следовательно, повысить оперативность оценки структурной связности в условиях равновесных вероятностей между узлами сети.

Основным предположением данного подхода является наличие равновесных вероятностей связи между всеми узлами сети [14,15]. Такое ограничение имеет преимущество в оценке структурной связности любой размерности сетевого графа, однако ограничивает рамки применимости модели, которые связаны с функционирова-

<sup>5</sup>Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь. 1983. 416 с.,

нием и назначением сети, а также видами деструктивных воздействий. В таких условиях структурная связность сети определяется как взаимосвязь между узлами коммутации, формирующая полносвязное и равновесное состояние структуры сети.

На платформе MATLAB был разработан программный код, который позволяет рассчитывать структурную связность сети для заданного числа узлов связи  $n$  и различных значений  $k$ , представляющих минимальное количество узлов, с которыми должна быть установлена связь. Программа также вычисляет среднее количество связей для всех узлов, которое меньше или больше определённого значения  $k$ . Итоговый результат представляет собой график зависимости структурной связности от параметров системы, что обеспечивает наглядность и удобство анализа.

Алгоритм расчета структурной связности сетевого графа интегрированной радиотехнической системы приведен на рис. 1. Он включает следующие процедуры:

1. Ввод параметров: запрос количества узлов  $n$  и минимальное количество узлов для связи  $k$ ;

запрос на ввод значений вероятностей ветвей графа  $p$ .

2. Расчет структурной связности. Для каждого значения  $p$  и каждого значения  $k$  вычисляется структурная связность  $C_k$  с использованием модели Бернулли. Далее определяются средние значения структурной связности для значений  $k$  меньших, равных и больших заданного значения  $k$ .

3. Визуализация результатов. Строится столбчатая диаграмма зависимости средней структурной связности от вероятности  $p$  для различных значений  $k$ . Затем линейный график зависимости структурной связности от  $k$  для различных значений  $p$ .

Для реализации вышеописанного алгоритма были написаны основные фрагменты кода на MATLAB. Этот алгоритм и код позволяют оперативно анализировать структурную связность сетей связи, используя простые и понятные методы вычислений. Полученные результаты предоставляют значимые данные для оценки структурной связности, позволяя учесть стохастическую природу сетевых процессов.

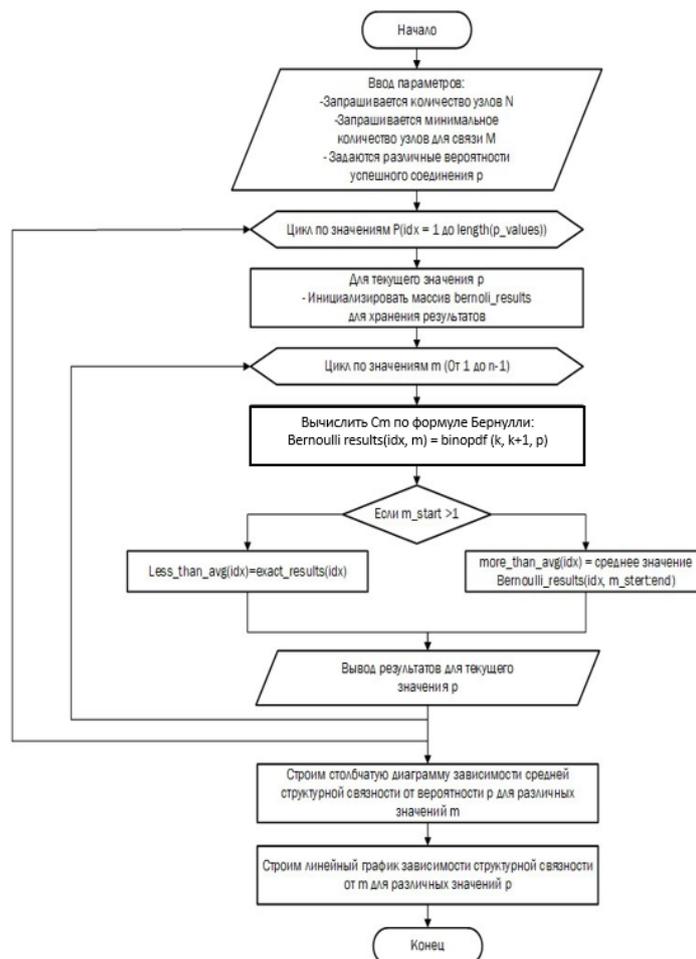


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы

Результаты исследований структурной связности радиотехнической сети с десятью узлами от количества межузловых связей и значений вероятности соединения узлов (вероятности ребер графа) приведены на рис. 2. Анализ полу-

ченных зависимостей показывает, что при вероятностном подходе к оценке показателя структурной связности фрагмента сетевого графа его нормированное значение уменьшается по сравнению с оценкой по классическим методикам.

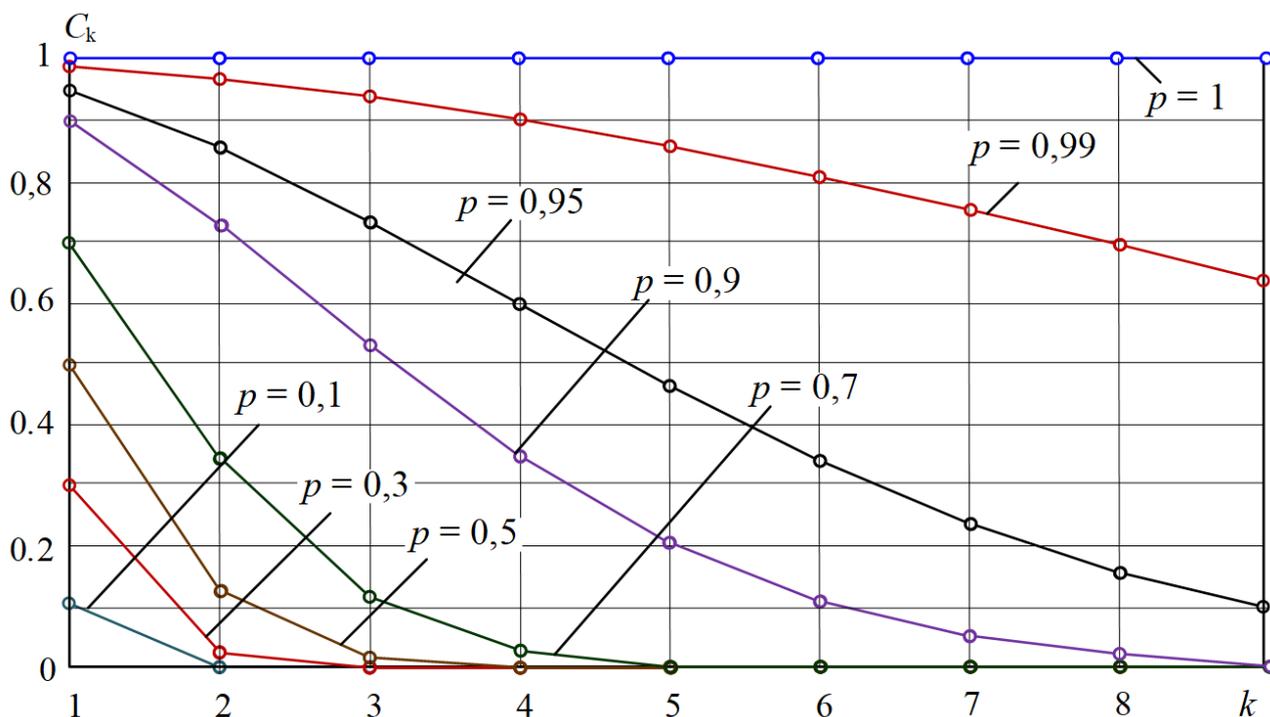


Рис. 2. График зависимости структурной связности от k для различных вероятностей

Анализ полученных зависимостей показывает, что при вероятностном подходе к оценке показателя структурной связности фрагмента сетевого графа его нормированное значение уменьшается по сравнению с оценкой по классическим методикам. Это связано с тем, что при наличии связи между узлами, вес связующего ребра не равен единице как в классическом подходе, а имеет вероятностный характер связи (меньше равен единице), так как отражает степень деструктивного воздействия на ребра сетевого графа, что отражает реальную действительность.

С уменьшением значения вероятности связи между узлами показатель структурной связности уменьшается, т.е. снижается устойчивость (живучесть) сети по причине деструктивных воздействий на ее элементы.

При увеличении количества узлов сети, но ограничении на число связей между ними (например, по причине уменьшения дальности связи или других факторов) даже при высокой вероятности связей показатель структурной связности значительно снижается.

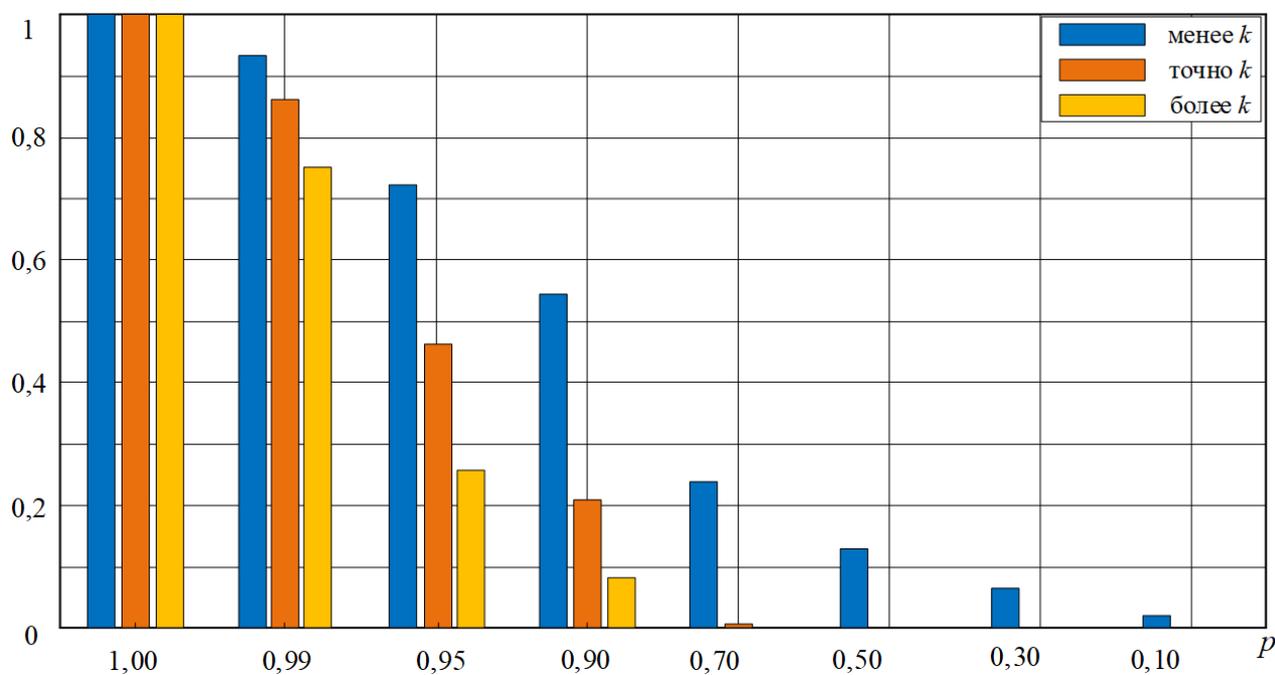
Также необходимо отметить, что в полностью связной структуре сети из 10 узлов показатель связности уменьшился на 36% по сравнению с классической оценкой. Этот эффект связан с тем, что несмотря на практически полную вероятную связь в сложных сетях с увеличением числа узлов возрастает количество возможных пораженных путей. Поэтому даже небольшие отклонения в вероятностях ветвей оказывают существенное влияние на общую структурную связность. Этот результат доказывает тот факт, что чем сложнее структура сети, тем большая надежность должна быть ее ребер.

Полученные результаты демонстрируют важность учета надежности отдельных связей в сложных системах. Анализ качества межузловых зависимостей позволит выявлять критически слабые места сети, оптимизировать ее структуру и на конечном этапе разрабатывать стратегии повышения живучести системы.

Вторая часть программы позволяет проводить анализ связности сети в зависимости от количества ветвей графа, превышающих или не-

достающих до требуемого (заданного) значения. Этот этап особенно важен для аналитической работы, так как позволяет не только определить точную вероятность связи узлов, но и рассчитать средние значения вероятностей для меньших и больших значений ветвей. Такая детализация

дает возможность формировать более точные и обоснованные выводы об архитектуре системы связи. Полученные диаграммы структурной связности сети (рис. 3.) предоставляют значимые данные для оценки структурной связности, учитывая стохастическую природу сетевых процессов.



*Рис. 3. Средняя структурная связность для менее, точно и более k*

Анализ свидетельствует о том, что структурная связность не является фиксированным (детерминированным) значением, а представляет собой стохастический процесс, зависящий от множества факторов, таких как вероятность деструктивных воздействий, количество узлов и характер связей между ними. Для аналитической работы данная диаграмма более значимая так как по ней определяется точная вероятность, а также средняя для меньших и больших значений. Это позволяет сделать более точное оценочное заключение по архитектуре системы связи и способствует глубокому пониманию поведения сложных сетей в различных условиях, что важно для проектирования устойчивых и эффективных структур систем связи.

**Заключение**

Разработанная математическая модель оценки и анализа структурной связности интегрированных радиотехнических систем с вероятностным характером межузловых связей отражает значительный потенциал для оценки устойчивости и работоспособности сетей в условиях де-

структивных воздействий. В рамках настоящего исследования был предложен методологический подход, основанный на использовании модели Бернулли, которая позволяет упростить расчеты и повысить оперативность оценки структурной связности при наличии равновесных вероятностей связи между узлами сети в условиях влияния деструктивных факторов.

Основной целью исследования являлось создание простой, но адекватной воздействиям модели оценки структурной связности и разработка программного обеспечения для ее расчета. Необходимо заметить, что предложенная методология оценки структурной связности сетевого графа позволяет оценить устойчивость сети в целом в рамках живучести к деструктивным воздействиям на элементы сети, но она не дает информации о других свойствах сети, например, таких как, своевременность доставки информации, коэффициенты исправного действия маршрута, направления связи и т.п. Очевидно, что в реальных условиях вероятности связи между узлами не могут быть одинаковыми из-за множества факторов, таких как различия в характеристиках

оборудования, разнообразия в внешних условиях и деструктивных воздействиях и другие. Однако, принятые допущение о равновесных вероятностях связи, позволили разработать базовый алгоритм и программную реализацию, которая служит фундаментом для дальнейших исследований и расширений.

Полученные результаты исследований могут быть положены в основу научного обоснования и сравнительного анализа структурной живучести радиотехнических сетей различной сложности, в том числе интегрированных, а также для проведения ситуационного анализа устойчивости сетей к деструктивным воздействиям и оперативной оценки деформации межузловых связей. Аналитическая работа с результатами оценки системных показателей сети позволит определять слабые звенья сети, задавать научно обоснованные требования к вероятностным показателям элементов сети и формулировать точные оценочное заключение по структурной

связности системы в различных условиях функционирования, что важно для проектирования устойчивых и эффективных структур систем связи.

Перспективами дальнейшего развития является совершенствование модели и программного обеспечения для оценки не только структурной, но и функциональной связности. Совершенствование модели может быть направлено на учет вероятностей разнородных ветвей связи, добавление поглощающих узлов связи и циклических узлов, что позволит учитывать более сложные сценарии функционирования сетей, такие как асимметричные ветви, динамические изменения топологии и задержки в узлах, а также обеспечит более точные прогнозы производительности и надежности сетей в реальных условиях эксплуатации. В целом такой подход будет иметь важное значение в условиях быстро меняющейся обстановки, технологий и содержания военных конфликтов.

### Литература

1. Михайлов. Р.Л. Радиоэлектронная борьба в Вооружённых силах США: военно-теоретический труд. - СПб.: Научно-техническое издательство «Лань», 2018. – 131 с.
2. Дятлов А.П., Дятлов П.А., Кульбикаян Б.Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. – М.: Радио и связь, 2004. 227 с. ISBN: 5-256-01750-0
3. Батенков К.А., Батенков А.А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости // Труды СПИИРАН. 58 (2018), С.128–159. <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
4. Yusuf M.N., Bakar K.b.A., Isyaku B., Saheed A.L. Review of Path Selection Algorithms with Link Quality and Critical Switch Aware for Heterogeneous Traffic in SDN. *Int. J. Electr. Computer Eng. Syst.* 2023;14(3). С. 345–370. <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.3.12>
5. Коцыняк М. А., Лаута О. С., Нечепуренко А. П., Штеренберг И. Г. Методика оценки устойчивости информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного воздействия // Труды учебных заведений связи. 2016. № 4. С. 82-87 DOI: 10.15688/jvolsu10.2017.2.2.
6. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Расчет структурной устойчивости сети связи методом поглощения // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020666401 от 09.12.2020
7. Шерстнев О.Г. Определение показателей структурной надежности сети связи // Вестник РГРТУ. 2020. № 72 С. 48–54.
8. Якушенко С.А., Дворников С.В. Математическая модель оценки структурной связности сложных систем с неустойчивыми связями. *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы.* 2019. С. 199–206.
9. Батенков К.А. Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Труды СПИИРАН. 18 (2019). С. 1093–1118. <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
10. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий // Информационно-управляющие системы. 6(2021). С. 53–63. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-53-63>
11. Lashgari M., Tonini F., Capacchione M., Woosinka L., Rigamonti G., Monti P. Techno-economics of Fiber vs. Microwave for Mobile Ntransport Network Deployments. *J. Opt. Comm. and Netw.* 2023;15(7):С.74–87. <https://doi.org/10.1364/JOCN.482865>
12. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Анализ вероятности связности телекоммуникационной сети на основе инверсий ее состояний. *Вестник Томского государственного университета // Управление, вычислительная техника и информатика.* 2022. № 59. С.91–98. DOI: 10.17223/19988605/59/10
13. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Формирование сечений телекоммуникационных сетей для анализа их устойчивости с различными мерами связности // Информатика и автоматизация. 2021. №20(2). С.371–406. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>

14. Bosisio A., Berizzi A., Lupis D., Morotti A., Iannarelli G., Greco B. A Tabu-search-based Algorithm for Distribution Network Restoration to Improve Reliability and Resiliency. *J. Modern Power Systems and Clean Energy*. 2023;11(1):302–311. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000150>
15. Анфёров М.А. Алгоритм поиска подкритических путей на сетевых графиках // Российский технологический журнал. 2023. Том 11. №1(23). С. 60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>

## PROBABILISTIC MODEL FOR ESTIMATING THE STRUCTURAL CONNECTIVITY OF NETWORKS RADIO ENGINEERING SYSTEMS IN CONDITIONS OF DESTRUCTIVE IMPACTS

Yakushenko S.A.<sup>1</sup>, Shevyakov V.D.<sup>2</sup>, Sadovnikov V.E.<sup>3</sup>, Gladkikh D.S.<sup>4</sup>

**Keywords:** radio engineering networks of information transmission, network stability, network survivability, network graph, equilibrium state, Bernoulli formula, network stability.

### Abstract

**The purpose of the work** is to develop a methodological approach to assessing the structural connectivity of integrated radio engineering systems with the probabilistic nature of internode connections based on the analysis and generalization of the structural properties of network data graphs.

**Research method:** the research method combines a complex combination of the Bernoulli model and simulation modeling based on the MATLAB software platform to calculate the probability of successful connection between the nodes of the radio engineering information transmission network. This approach allows taking into account the uncertainty factor and multifaceted processes when modeling structural connectivity. An important aspect is the presence of equilibrium probabilities of communication between all nodes of the network, which allows you to use the probabilistic Bernoulli model to calculate the structural connectivity of the vertices of a network graph.

**Results of the study:** the results will allow us to assess the structural connectivity of radio engineering networks in the dynamics of changes in probabilistic inter-node connections, as well as to formulate scientifically based requirements for the structural parameters of the network, such as the number of nodes, branches and inter-node connections for the successful functioning of the network under the influence of external destructive factors. These aspects will form the basis for the further development of algorithms and methods for analyzing and evaluating properties military communication networks.

**Scientific novelty:** for the first time, the probabilistic Bernoulli model is used in combination with simulation modeling in the MATLAB software environment for quantitative assessment and comparative analysis of the structural connectivity of radio engineering information transmission networks, which makes it possible to simulate various situations of a probabilistic nature that arise under destructive external influences. The paper presents a formalized approach to the calculation of structural connectivity, taking into account the degree of influence and contribution of structural parameters to the overall assessment of the stability of radio engineering networks.

### References

1. Mihajlov. R.L. Radioelektronnaja bor'ba v Vooruzhjonnyh silah SShA: voenno-teoreticheskij trud. - SPb.: Naukojomkie tehnologii, 2018. – 131 s.
2. Djatlov A.P., Djatlov P.A., Kul'bikajan B.H. Radioelektronnaja bor'ba so sputnikovymi radi-onavigacionnymi sistemami. – M.: Radio i svjaz', 2004. 227 s. ISBN: 5-256-01750-0
3. Batenkov K.A., Batenkov A.A. Analiz i sintez struktur setej svjazi po determinirovannym pokazateljam ustojchivosti // Trudy SPIIRAN. 58 (2018), S.128–159. <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
4. Yusuf M.N., Bakar K.b.A., Isyaku B., Saheed A.L. Review of Path Selection Algorithms with Link Quality and Critical Switch Aware for Heterogeneous Traffic in SDN. *Int. J. Electr. Computer Eng. Syst.* 2023;14(3). S. 345–370. <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.3.12>

<sup>1</sup>Sergey A. Yakushenko, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Military Academy of Communications named after S.M. Budenny, St. Petersburg, Russia. E mail: was16@mail.ru

<sup>2</sup>Vladislav D. Shevyakov, Junior Researcher, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: Vlad89312239540.la@yandex.ru

<sup>3</sup>Vladimir E. Sadovnikov, Junior Researcher, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: bladimir1998@mail.ru

<sup>4</sup>Dmitry S. Gladkikh, Junior Researcher, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: mr.zid2004@mail.ru

5. Kocynjak M. A., Lauta O. S., Nechepurenko A. P., Shterenberg I. G. Metodika ocenki ustojchi-vosti informacionno-telekommunikacionnoj seti v uslovijah informacionnogo vozdejstvija // Trudy uchebnyh zavedenij svjazi. 2016. № 4. S. 82-87 DOI: 10.15688/jvolsu10.2017.2.2.
6. Odoevskij S. M., Lebedev P. V. Raschet strukturnoj ustojchivosti seti svjazi metodom po-gloshhenija // Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeVM RU 2020666401 ot 09.12.2020
7. Sherstnev O.G. Opredelenie pokazatelej strukturnoj nadezhnosti seti svjazi // Vestnik RGRTU. 2020. № 72. C. 48–54.
8. Jakushenko S.A., Dvornikov S.V. Matematicheskaja model' ocenki strukturnoj svjaznosti slozhnyh sistem s neustojchivymi svjazjami. Volnovaja jelektronika i infokommunikacionnye sistemy. 2019. S. 199–206.
9. Batenkov K.A. Tochnye i granichnye ocenki verojatnostej svjaznosti setej svjazi na osnove me-toda polnogo perebora tipovyh sostojanij // Trudy SPIIRAN. 18 (2019). S. 1093–1118. <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
10. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Verojatnost' svjaznosti telekommunikacionnoj seti na osnove privedenija neskol'kih sobytij nesvjaznosti k ob#edineniju nezavisimyh sobytij // Informacionno-upravljajushhie sistemy. 6(2021). S. 53–63. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-53-63>
11. Lashgari M., Tonini F., Capacchione M., Woosinka L., Rigamonti G., Monti P. Techno-economics of Fiber vs. Microwave for Mobile Ntransport Network Deployments. J. Opt. Comm. and Netw. 2023;15(7):C.74–87. <https://doi.org/10.1364/JOCN.482865>
12. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Analiz verojatnosti svjaznosti telekommunikaci-onnoj seti na osnove inversij ee sostojanij. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta // Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika. 2022. № 59. S.91–98. DOI: 10.17223/19988605/59/10
13. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Formirovanie sechenij telekommunikacionnyh setej dlja analiza ih ustojchivosti s razlichnymi merami svjaznosti // Informatika i avtomatizacija. 2021. №20(2). S.371–406. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>
14. Bosisio A., Berizzi A., Lupis D., Morotti A., Iannarelli G., Greco B. A Tabu-search-based Algo-rithm for Distribution Network Restoration to Improve Reliability and Resiliency. J. Modern Power Systems and Clean Energy. 2023;11(1):302–311. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000150>
15. Anfjorov M.A. Algoritm poiska podkriticheskikh putej na setevyh grafikah // Rossijskij tehnologicheskij zhurnal. 2023. Tom 11. №1(23). S. 60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫМ СПЕКТРОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Мешалкин В.А.<sup>1</sup>, Лукьянчик В.Н.<sup>2</sup>, Коньков Д.И.<sup>3</sup>, Поляков Д.Н.<sup>4</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-2- 74-80

**Ключевые слова:** спектральная плотность, стохастические процессы, численные методы, дифференциальные уравнения, оптимизация, регуляризация, электромагнитная совместимость, адаптивное управление, системы радиосвязи.

**Цель исследования:** Разработка и теоретическое обоснование математического аппарата эвристического метода управления радиочастотным спектром, обеспечивающего эффективное распределение частотного ресурса в условиях неопределенности и неполноты исходных данных с учетом динамически изменяющейся электромагнитной обстановки.

**Метод исследования:** Работа базируется на комплексном применении методов математического моделирования, теории дифференциальных уравнений, численного анализа и стохастического моделирования. Используется аппарат функционального анализа, теории оптимизации и вариационного исчисления. Математическая модель строится на основе стохастических дифференциальных уравнений в частных производных с учетом экспертных оценок.

**Результаты:** Разработана математическая модель эвристического метода управления радиочастотным спектром, включающая стохастические компоненты и механизмы учета экспертных оценок. Создан оригинальный функционал оптимизации с пространственной регуляризацией и учетом временной динамики. Получены аналитические выражения для оценки погрешности метода и условий его устойчивости. Разработаны эффективные численные алгоритмы, обеспечивающие возможность работы системы в режиме реального времени. Предложена методика адаптивной настройки параметров модели на основе экспериментальных данных.

**Научная новизна:** Предложен математический аппарат, объединяющий строгие аналитические методы с возможностью учета эвристических оценок в задаче управления радиочастотным спектром. Разработан новый подход к построению функционала качества, учитывающего как детерминированные, так и стохастические компоненты. Получены оригинальные аналитические выражения для оценки времени достоверного прогноза состояния системы. Предложен способ адаптивной коррекции параметров модели на основе анализа текущего состояния системы. Разработан новый алгоритм численного решения стохастических дифференциальных уравнений с переменным шагом дискретизации.

**Вклад авторов:** Мешалкин В. А. Разработка теоретических основ эвристического метода управления радиочастотным спектром; Формулировка стохастических дифференциальных уравнений модели (уравнения 1–3); Научное руководство исследованием и общая координация работы коллектива; Разработка функционала оптимизации распределения спектра (уравнения 4–5).

Лукьянчик В. Н. Разработка методов решения уравнений Эйлера-Лагранжа (уравнения 6–7); Анализ устойчивости численной схемы и разработка критериев стабильности (уравнения 10–12); Проведение сравнительного анализа эффективности предложенного метода с существующими подходами; Методология внедрения системы и калибровка параметров (уравнения 30–31).

Коньков Д. И. Разработка численной реализации метода и конечно-разностной схемы (уравнения 8–9); Оценка погрешностей численного решения (уравнения 13–14); Проведение численного моделирования для различных конфигураций; Анализ вычислительной эффективности алгоритма (уравнения 21–22).

Поляков Д. Н. Анализ динамических характеристик системы (уравнения 18–19); Оптимизация параметров регуляризации (уравнение 20); Разработка системы адаптивной коррекции параметров модели (уравнения 23–24); Оценка надежности системы и анализ статистики отказов (уравнения 32–33).

<sup>1</sup>Мешалкин Валентин Андреевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи имени Маршала Союза С.М.Буденного г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: meshalkin\_va@mail.ru

<sup>2</sup>Лукьянчик Валентин Николаевич, кандидат военных наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи имени Маршала Союза С.М.Буденного г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: v-lukyanchik@bk.ru

<sup>3</sup>Коньков Денис Иванович, адъюнкт Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: den.konkov.94@mail.ru

<sup>4</sup>Поляков Дмитрий Николаевич, адъюнкт Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bryanik51@mail.ru

### Введение

Современный этап развития телекоммуникационных технологий характеризуется экспоненциальным ростом объемов передаваемой информации, что приводит к значительному увеличению нагрузки на радиочастотный спектр [1]. Анализ современного состояния проблемы показывает, что существующие методы управления спектром, основанные на детерминированных моделях, демонстрируют недостаточную эффективность в условиях динамически меняющейся электромагнитной обстановки и наличия неопределенности в исходных данных [2:3].

### Теоретические основы эвристического метода

В основе математической модели лежит стохастическое дифференциальное уравнение в частных производных:

$$\frac{\partial S(f,t)}{\partial t} = D\nabla^2 S(f,t) + \sigma(f,t)\xi(t) + F(S,f,t), \quad (1)$$

где  $S(f,t)$  представляет спектральную плотность мощности, (Вт/Гц), данная величина характеризует распределение энергии сигнала по частотам в каждый момент времени; коэффициент  $D$  является коэффициентом спектральной диффузии, (Гц<sup>2</sup>/с) и описывающим скорость расплывания спектра во времени;  $\nabla^2 S(f,t)$  — лапласиан спектральной плотности (1/Гц<sup>2</sup>), характеризующий кривизну спектра;  $\sigma(f,t)$  — амплитуда флуктуаций (Вт/(Гц·√с)),  $\xi(t)$  — нормированный белый шум (1/√с).

Член  $F(S,f,t)$  описывает внешние управляющие воздействия и может быть представлен в виде:

$$F(S,f,t) = \gamma(t) \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} W(f,f') S(f',t) df' + h(f,t) \quad (2)$$

где  $\gamma(t)$  — коэффициент обратной связи системы управления, характеризующей чувствительность системы к управляющим воздействиям (1/с), определяющий степень влияния частотных компонент;  $f_{\max}, f_{\min}$  границы рабочего диапазона частот (Гц);  $h(f,t)$  — функция, описывающая непосредственное внешнее управляемое воздействие на систему (Вт/Гц·с), задаваемое оператором;  $W(f,f')$  — ядро интегрального оператора, описывающее взаимное влияние различных частотных компонент:

$$W(f,f') = W_0 \exp\left(-\frac{(f-f')^2}{2\Delta f^2}\right) + W_1 \sum_{k=1}^N (f-f_k)(f'-f_k) \quad (3)$$

где  $W_0$  — амплитуда сглаживающего воздействия, определяемая экспериментально для конкретной системы;  $f, f'$  — текущая и переменная частота интегрирования соответственно (Гц);  $\Delta f$  — характерный масштаб частотной корреляции (Гц);  $W_1$  — интенсивность точечного воздействия;  $f_k$  — набор характерных частот (Гц), определяемых техническими особенностями оборудования;  $\delta(x)$  — дельта-функция Дирака (1/Гц), используемая для описания точечных воздействий;  $N$  — количество характерных частот в системе, определяемое конструкцией оборудования.

### Функционал оптимизации

Для оптимизации распределения спектра используется следующий функционал:

$$J[S] = \int_0^T \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left[ Q(S) + \mu |\nabla S|^2 + \alpha \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right)^2 \right] df dt, \quad (4)$$

где  $J[S]$  — функционал качества управления (Вт·с/Гц);  $T$  — время оптимизации (с);  $\mu$  — коэффициент пространственной регуляризации (Гц<sup>2</sup>);  $|\nabla S|^2$  — коэффициент градиента спектральной плотности ((Вт/Гц<sup>2</sup>)<sup>2</sup>);  $\alpha$  — коэффициент временной регуляризации (с<sup>2</sup>);  $(\partial S/\partial t)^2$  — квадрат скорости изменения спектра ((Вт/(Гц·с))<sup>2</sup>);  $Q(S)$  — функция качества, определяемая как:

$$Q(S) = -\beta_1 S \ln S + \beta_2 (S_{\max} - S)^2 \beta_3 \int K(f,f') S(f) S(f') df, \quad (5)$$

где  $\beta_1$  — коэффициент энтропийного члена, определяющий степень равномерности распределения;  $\beta_2$  — коэффициент штрафа за превышение максимальной мощности (1/(Вт/Гц));  $\beta_3$  — коэффициент взаимного влияния частот (1/Гц);  $S_{\max}$  — максимально допустимая спектральная плотность (Вт/Гц);  $K(f,f')$  — ядро оператора взаимодействия (1/Гц).

### Метод решения

Минимизация функционала приводит к системе уравнений Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \alpha \frac{\partial S}{\partial t} \right) - \mu \nabla^2 S + \frac{\partial Q}{\partial S} = 0 \quad (6)$$

Данное уравнение дополняется граничными условиями:

$$\begin{cases} S(f,0) = S_0(f) \\ \frac{\partial S}{\partial f} \Big|_{f=f_{\min}} = \frac{\partial S}{\partial f} \Big|_{f=f_{\max}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где  $S_0(f)$  представляет начальное распределение спектральной плотности мощности, а условия на границах частотного диапазона обеспечивают отсутствие потока энергии через границы рассматриваемой области.

### Численная реализация

Для численного решения уравнений используется конечно-разностная схема с адаптивным шагом по времени [4]:

$$\frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t_n} = D \frac{S_{i+1}^n - 2S_i^n + 2S_{i-1}^n}{(\Delta f)^2} + \sigma_i^n \psi^n + F_i^n. \quad (8)$$

где  $S_i^n$  — значение спектральной плотности в  $i$ -ом узле сетки на  $n$ -ом временном слое (Вт/Гц);  $\Delta f$  — шаг по частоте (Гц), выбирается исходя из требуемой точности;  $\psi^n$  — дискретная реализация белого шума ( $1/\sqrt{c}$ );  $F_i^n$  — дискретное представление внешних действий (Вт/(Гц·с)).

Шаг по времени  $\Delta t_n$  определяется из условия устойчивости:

$$\Delta t_n = \min \left\{ \frac{(\Delta f)^2}{2D}, \frac{\varepsilon}{\|\partial S / \partial t\|_{\max}} \right\}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  — заданная точность вычислений, а  $\|\partial S / \partial t\|_{\max}$  — максимальная скорость изменения спектральной плотности.

### Анализ устойчивости

Устойчивость численной схемы анализируется методом фон Неймана. Подстановка пробных решений вида:

$$S_j^n = \lambda^n e^{ik_j \Delta x}, \quad (10)$$

приводит к дисперсионному соотношению:

$$\lambda = 1 - 4D \frac{\Delta t}{(\Delta f)^2} \sin^2 \left( \frac{k \Delta f}{2} \right) + i \sigma \Delta t \zeta_k, \quad (11)$$

Условие устойчивости требует выполнения неравенства  $|\lambda| \leq 1$ , что приводит к модифицированному критерию Куранта-Фридриха-Леви:

$$\frac{D \Delta t}{(\Delta f)^2} + \frac{\sigma^2 \Delta t}{2} \leq \frac{1}{2} \quad (12)$$

### Оценка погрешности

Погрешность численного решения оценивается в норме пространства  $L_2$ :

$$\varepsilon = \|S_{\text{num}} - S_{\text{exact}}\|_{L_2} = \left( \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |S_{\text{num}}(f) - S_{\text{exact}}(f)|^2 df \right)^{1/2}. \quad (13)$$

где  $\varepsilon$  — среднеквадратичная погрешность решения (Вт/Гц);  $S_{\text{num}}(f)$  — численное решение (Вт/Гц);  $S_{\text{exact}}(f)$  — точное решение (Вт/Гц).

Для схемы первого порядка по времени и второго по пространству теоретическая оценка погрешности имеет вид:

$$\varepsilon \leq C (\Delta t + (\Delta f)^2), \quad (14)$$

где константа  $C$  зависит от гладкости решения и параметров задачи.

### Метод оптимизации параметров

Для оптимизации параметров модели используется вариационный подход. Вариация функционала качества имеет вид:

$$\delta J = \int_0^T \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left[ \frac{\delta Q}{\delta S} \delta S + 2i \nabla S \cdot \nabla \delta S + 2 \dot{a} \frac{\partial S}{\partial t} \frac{\partial \delta S}{\partial t} \right] df dt \quad (15)$$

### Результаты численного моделирования

Численное моделирование проводилось для различных конфигураций системы радиосвязи с целью исследования эффективности предложенного метода в широком диапазоне условий функционирования. Существенное внимание уделялось анализу влияния параметров модели на качество получаемых решений. В частности, исследовалась зависимость точности результатов от выбора коэффициента спектральной диффузии и параметров стохастической составляющей.

Базовый коэффициент спектральной диффузии варьировался в диапазоне:

$$D_0 \in [10^{-6}, 10^{-4}] \text{ Гц}^2/\text{с} \quad (16)$$

При этом амплитуда флуктуаций выбиралась из интервала:

$$\sigma(f, t) \in [10^{-8}, 10^{-6}] \text{ Вт}/(\text{Гц} \sqrt{\text{с}}), \quad (17)$$

Анализ результатов моделирования показал, что при малых значениях коэффициента диффузии система демонстрирует квазистационарное поведение. В этом режиме наблюдаются локализованные области повышенной спектральной плотности, которые сохраняют свою структуру на протяжении длительного времени. Данный эффект объясняется преобладанием процессов локальной концентрации энергии над процессами диффузионного расплывания спектра.

### Анализ динамических характеристик

Исследование динамических характеристик системы показало, что время установления стационарного режима существенно зависит от

начального распределения спектральной плотности. Теоретическая оценка времени установления может быть получена из анализа характерных масштабов задачи:

$$T_{est} \approx \frac{(f_{max} - f_{min})^2}{4\pi^2 D_0} \quad (18)$$

Данная оценка хорошо согласуется с результатами численного моделирования при условии, что амплитуда стохастических флуктуаций не превышает критического значения:

$$\delta_{crit}(f) = \sqrt{2D_0} \left| \frac{\partial S_0}{\partial f} \right| \quad (19)$$

При превышении критического значения амплитуды флуктуаций наблюдается качественное изменение динамики системы, характеризующееся появлением множественных нестационарных структур в частотном пространстве. Физическая интерпретация данного эффекта связана с конкуренцией процессов детерминированного и стохастического переноса энергии в спектре сигнала.

### Оптимизация параметров регуляризации

Важным аспектом практической реализации метода является выбор оптимальных значений параметров регуляризации. Коэффициенты функционала качества определяют баланс между различными требованиями к распределению спектральной плотности. Теоретический анализ показывает, что оптимальные значения параметров должны удовлетворять системе неравенств:

$$\begin{cases} \beta_1 > \frac{\|\nabla S\|_{L_2}^2}{\|S \ln S\|_{L_1}} \\ \beta_2 > \frac{\|\partial S / \partial t\|_{L_2}^2}{2\|S_{max} - S\|_{L_2}^2} \\ \beta_3 > \frac{\|\nabla^2 S\|_{L_2}}{\|K * S\|_{L_2}} \end{cases} \quad (20)$$

### Анализ вычислительной эффективности

Исследование вычислительной сложности алгоритма показало, что время расчета одного временного шага определяется преимущественно операциями вычисления интегральных членов в функционале качества. Общая вычислительная сложность алгоритма оценивается как:

$$T_{comp} = O(N_f \log N_f) \quad (21)$$

где  $N_f$  представляет число узлов частотной сетки. Данная оценка учитывает использование быстрого преобразования Фурье для вычисления свертки в интегральных операторах.

Практические тесты подтверждают возможность применения метода в системах реального времени при условии, что число узлов сетки не превышает критического значения:

$$N_f \leq N_{crit} = \left\lfloor \frac{T_{real}}{C_{comp} \log_2(T_{real} / \Delta t)} \right\rfloor, \quad (22)$$

где  $T_{real}$  — требуемое время реакции системы, а  $C_{comp}$  — константа, зависящая от производительности вычислительной платформы.

### Практическая реализация метода

Практическое внедрение разработанного математического аппарата требует особого внимания к вопросам численной реализации алгоритмов и их оптимизации [5]. Ключевым аспектом является выбор эффективных структур данных для хранения и обработки спектральной информации [6]. Реализация интегральных операторов осуществляется с использованием быстрого преобразования Фурье, что позволяет существенно снизить вычислительную сложность алгоритма [7–10].

Важным элементом практической реализации является система адаптивной коррекции параметров модели. Коэффициенты пересчитываются на основе анализа текущего состояния системы согласно выражению:

$$\begin{pmatrix} \beta_1^{n+1} \\ \beta_2^{n+1} \\ \beta_3^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1^n \\ \beta_2^n \\ \beta_3^n \end{pmatrix} + \eta \mathbf{H}^{-1} \nabla J \quad (23)$$

где  $\eta$  — параметр скорости обучения,  $\mathbf{H}$  — матрица Гессе функционала качества, а  $\nabla J$  — градиент функционала. Матрица Гессе вычисляется как:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_1^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_1 \partial \beta_2} & \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_1 \partial \beta_3} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_2 \partial \beta_1} & \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_2^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_2 \partial \beta_3} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_3 \partial \beta_1} & \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_3 \partial \beta_2} & \frac{\partial^2 J}{\partial \beta_3^2} \end{pmatrix} \quad (24)$$

### Анализ точности метода

Исследование точности метода проводилось

путем сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Относительная погрешность определялась как:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\|S_{dum} - S_{ex}\|_{L_2}}{\|S_{dx}\|_{L_2}} \times 100\% \quad (25)$$

Статистический анализ результатов показал, что при оптимальных значениях параметров модели относительная погрешность не превышает 5% в широком диапазоне условий функционирования системы. При этом функция распределения ошибок хорошо аппроксимируется нормальным законом:

$$\rho(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (26)$$

### Сравнительный анализ эффективности

Для оценки эффективности предложенного метода был проведен сравнительный анализ с существующими подходами к управлению радиочастотным спектром. В качестве критериев сравнения использовались:

Интегральный показатель эффективности использования спектра:

$$E = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f) df}{\Delta f \cdot S_{max}} \cdot \frac{T_{useful}}{T_{total}} \quad (27)$$

где  $T_{useful}$  — время полезного использования спектра, а  $T_{total}$  — общее время наблюдения. Коэффициент спектральной эффективности определяется выражением:

$$\eta_{spec} = \frac{\int_0^T \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, t) \ln\left(\frac{S(f, t)}{S_{noise}}\right) df dt}{T \Delta f \ln(1 + SNR_{max})}. \quad (28)$$

### Теоретические ограничения метода

Теоретический анализ показывает наличие фундаментальных ограничений на применимость разработанного метода. Эти ограничения связаны с принципиальной невозможностью точного предсказания поведения стохастической системы на больших временных интервалах. Максимальное время надежного прогноза может быть оценено через характерное время Ляпунова:

$$T_{pred} \approx \frac{1}{\lambda_{max}} \ln\left(\frac{\Delta S_{max}}{\Delta S_0}\right), \quad (29)$$

где  $\lambda_{max}$  — старший показатель Ляпунова системы,  $\Delta S_0$  — начальная неопределенность в определении состояния системы, а  $\Delta S_{max}$  — максимально допустимая погрешность прогноза.

### Методология внедрения системы

Внедрение разработанной системы управления радиочастотным спектром требует системного подхода, учитывающего все аспекты функционирования телекоммуникационной инфраструктуры. Процесс адаптации математического аппарата к конкретным условиям эксплуатации осуществляется поэтапно, с постепенным уточнением параметров модели на основе накапливаемых экспериментальных данных.

Калибровка параметров системы производится на основе минимизации функционала невязки:

$$\Phi(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{k=1}^M \int_{f_{min}}^{f_{max}} w_k |S_{calc}(f, t_k) - S_{meas}(f, t_k)|^2 df \quad (30)$$

где  $(\alpha, \beta, \gamma)$  — калибруемые параметры модели;  $w_k(f)$  — весовая функция, учитывающая достоверность измерений в различных частотных диапазонах, а  $M$  — количество точек измерения во временной области;  $S_{calc}(f, t_k)$  — расчетное значение спектральной плотности (Вт/Гц);  $S_{meas}(f, t_k)$  — измеренное значение спектральной плотности (Вт/Гц). Оптимальные значения параметров определяются из условия:

$$(\alpha_{opt}, \beta_{opt}, \gamma_{opt}) = \arg \min_{\alpha, \beta, \gamma} \Phi(\alpha, \beta, \gamma). \quad (31)$$

### Оценка надежности системы

Надежность функционирования системы оценивается на основе анализа статистики отказов и сбоев. Вероятность безотказной работы в течение заданного интервала времени определяется выражением:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right) \quad (32)$$

где  $\tau$  — переменная интегрирования по времени;  $\lambda(\tau)$  — интенсивность отказов, зависящая от условий эксплуатации и качества настройки системы:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_b T}\right) \left[1 + a \left(\frac{\|S\|_{max}}{S_{nom}}\right)^2\right] \quad (33)$$

где  $\lambda_0$  — базовая интенсивность отказов (1/с);  $E_a$  — энергия, вызывающая деградацию компонентов системы (Дж);  $k_b$  — постоянная Больцма

на (Дж/К);  $T$  — абсолютная температура (К);  $a$  — коэффициент влияния нагрузки. Дальнейшее развитие предложенного подхода может осуществляться в нескольких направлениях. Первое направление связано с совершенствованием математического аппарата путем включения в модель дополнительных физических эффектов. В частности, перспективным представляется учет нелинейных эффектов через модифицированный оператор эволюции:

$$\zeta [S] = D\nabla^2 S + \chi^{(3)} |S|^2 S + \sigma(f; t)\xi(t), \quad (34)$$

где  $\chi^{(3)}$  — коэффициент нелинейности третьего порядка. Второе направление развития связано с оптимизацией вычислительных алгоритмов. Перспективным представляется использование адаптивных сеток с динамическим изменением шага дискретизации:

$$\Delta f_k = \Delta f_0 \exp\left(-\alpha \left| \frac{\partial^2 S}{\partial f^2} \right| \right) \quad (35)$$

### Обобщение результатов

Проведенное исследование позволяет сформулировать ряд фундаментальных положений относительно эффективности предложенного метода управления радиочастотным спектром. В частности, установлена зависимость качества управления от соотношения характерных времен

системы:

$$\kappa = \frac{T_{relax}}{T_{noise}} = \frac{D}{(\Delta f)^2 \delta^2} \quad (36)$$

При  $\kappa \geq 1$  система демонстрирует квазидетерминированное поведение с предсказуемой динамикой, в то время как при  $\kappa \leq 1$  существенную роль играют стохастические эффекты, требующие специальных методов обработки данных.

### Заключение

Разработанный математический аппарат эвристического метода управления радиочастотным спектром демонстрирует высокую эффективность при решении практических задач распределения частотного ресурса в условиях неопределенности. Теоретическая обоснованность метода подтверждается как аналитическими выкладками, так и результатами численного моделирования.

Основным достижением является создание комплексного подхода, объединяющего строгие математические методы с возможностью учета экспертных оценок. Практическая значимость работы подтверждается результатами внедрения разработанной системы в реальных условиях эксплуатации. Перспективы дальнейшего развития метода связаны с расширением его функциональных возможностей и оптимизацией вычислительных алгоритмов.

### Литература

1. Иванов А. А., Петров В. Н. Тенденции развития беспроводных сетей 5G/6G: проблемы спектральной эффективности // Инфокоммуникационные технологии. – 2022. – Т. 20. – № 3. – С. 45–52.
2. Сидоров М. И. Адаптивные методы управления радиочастотным спектром в условиях нестационарных помех // Электросвязь. – 2021. – № 5. – С. 12–18.
3. Кузнецова О. В., Смирнов К.А. Машинное обучение для управления спектром в условиях неопределенности // Труды ИПУ РАН. – 2020. – Т. 36. – № 4. – С. 89–101.
4. Королев С. А., Федоров В. М. Адаптивные конечно-разностные методы для решения нелинейных уравнений в частных производных // Вычислительные методы и программирование. – 2021. – Т. 22. – № 4. – С. 78–89.
5. Соколов А. В., Тимашов П. Р. Оптимизация алгоритмов численного моделирования в задачах электродинамики // Вычислительные методы и программирование. – 2021. – Т. 22. – № 2. – С. 34–45.
6. Ильин А. А., Кузнецова Т. М. Эффективные структуры данных для обработки спектральных сигналов // Информационные технологии. – 2022. – № 7. – С. 18–27.
7. Белов Д. К., Громов В. И. Применение быстрого преобразования Фурье в задачах интегральной оптики // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 1021–1035.
8. Коньков Д. И. Методика управления радиочастотным спектром для обеспечения электромагнитной совместимости средств и комплексов радиосвязи / Д. И. Коньков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 2. С. 356–364.
9. Высочин В. П. Совместное использование частотного ресурса для развития сетей 5G в диапазоне МГц / В. П. Высочин // Электросвязь. – 2019. – № 7. – С. 23–27.
10. Семисошенко М. А. Управление частотным ресурсом в группе частотно-адаптивных радиосетей / М. А. Семисошенко, И. О. Стрелков // Информация и космос. – 2020. – № 2. – С. 20–26.

# MATHEMATICAL MODELING OF THE HEURISTIC METHOD OF RADIO FREQUENCY SPECTRUM CONTROL UNDER UNCERTAINTY

Meshalkin V.A.<sup>1</sup>, Lukyanchik V.N.<sup>2</sup>, Konkov D.I.<sup>3</sup>, Polyakov D.N.<sup>4</sup>

**Keywords:** spectral density, stochastic processes, numerical methods, differential equations, optimization, regularization, electromagnetic compatibility, adaptive control, radio communication systems.

**Objective:** development and theoretical substantiation of the mathematical apparatus of the heuristic method of radio frequency spectrum management, which provides effective distribution of frequency resource in conditions of uncertainty and incompleteness of initial data, taking into account the dynamically changing electromagnetic environment.

**Research method:** The work is based on the complex application of mathematical modeling methods, the theory of differential equations, numerical analysis and stochastic modeling. The author uses the apparatus of functional analysis, optimization theory and calculus of variations.

**Results:** a mathematical model of the heuristic method of radio frequency spectrum management, including stochastic components and mechanisms for taking into account expert assessments, has been developed. An original optimization functionality with spatial regularization and time dynamics has been created. Analytical expressions have been obtained to assess the error of the method and the conditions of its stability. real-time. A method for adaptive adjustment of model parameters based on experimental data is proposed.

**Scientific novelty:** the author proposes a mathematical apparatus that combines strict analytical methods with the ability to take heuristic estimates into account in the problem of radio frequency spectrum management. A new approach to the construction of the quality functional, taking into account both deterministic and stochastic components, has been developed. analysis of the current state of the system. A new algorithm for numerical solution of stochastic differential equations with variable discretization step has been developed.

## References

1. Ivanov A. A., Petrov V. N. Tendencii razvitiya besprovodnyh setej 5G/6G: problemy spektral'noj jeffektivnosti // Infokommunikacionnye tehnologii. – 2022. – T. 20. – № 3. – S. 45–52.
2. Sidorov M. I. Adaptivnye metody upravlenija radiochastotnym spektrom v uslovijah nestacionarnyh pomeh // Jelektrosvjaz'. – 2021. – № 5. – S. 12–18.
3. Kuznecova O. V., Smirnov K.A. Mashinnoe obuchenie dlja upravlenija spektrom v uslovijah neopredelennosti // Trudy IPU RAN. – 2020. – T. 36. – № 4. – S. 89–101.
4. Korolev S. A., Fedorov V. M. Adaptivnye konechno-raznostnye metody dlja reshenija nelinejnyh uravnenij v chastnyh proizvodnyh // Vychislitel'nye metody i programirovanie. – 2021. – T. 22. – № 4. – S. 78–89.
5. Sokolov A. V., Timashov P. R. Optimizacija algoritmov chislennogo modelirovanija v zadachah jelektrodinamiki // Vychislitel'nye metody i programirovanie. 2021. T. 22. № 2. S. 34–45.
6. Il'in A. A., Kuznecova T. M. Jefferktivnye struktury dannyh dlja obrabotki spektral'nyh signalov // Informacionnye tehnologii. – 2022. – № 7. – S. 18–27.
7. Belov D. K., Gromov V. I. Primenenie bystrogo preobrazovanija Fur'e v zadachah integral'noj optiki // Komp'juternye issledovanija i modelirovanie. – 2020. – T. 12. – № 5. – S. 1021–1035.
8. Kon'kov D. I. Metodika upravlenija radiochastotnym spektrom dlja obespechenija jelektromagnitnoj sovmestivosti sredstv i kompleksov radiosvjazi / D. I. Kon'kov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki. 2025. № 2. S. 356–364.
9. Vysochin V. P. Sovmestnoe ispol'zovanie chastotnogo resursa dlja razvitiya setej 5G v diapazone MGc / V. P. Vysochin // Jelektrosvjaz'. – 2019. – № 7. – S.23–27.
10. Semisoshenko M. A. Upravlenie chastotnym resursom v gruppe chastotno-adaptivnyh radiosetej / M. A. Semisoshenko, I. O. Strelkov // Informacija i kosmos. – 2020. – №2. – S. 20–26.

<sup>1</sup>Valentin A. Meshalkin, Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E mai: meshalkin\_va@mail.ru

<sup>2</sup>Valentin Nikolaevich Lukyanchik, Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mai: v-lukyanchik@bk.ru

<sup>3</sup>Denis I. Konkov, adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: den.konkov.94@mail.ru

<sup>4</sup>Dmitry N. Polyakov, Adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: bryanik51@mail.ru

УДК, например, 004.056 и рубрика (по номенклатуре ВАК) статьи (красным цветом)

**НАЗВАНИЕ СТАТЬИ** ( – не более 10 слов)

**Максимов П.В.<sup>1</sup>, Панфилов П.Б.<sup>2</sup>**. Фамилия И.О. авторов через запятую

**DOI:** 10.24682/ заполняет редакция

**Ключевые слова:** через запятую 9-11 слов или словосочетаний, не совпадающих с терминами из названия статьи

**Аннотация.** Состоит из четырех явно выделенных абзацев (как здесь):

**Цель работы** (одно-два предложения) состоит в анализе и разработке.....

**Метод исследования** (три-четыре предложения),

**Результаты исследования:** что дало. Рекомендуется придерживаться ГОСТ 7.9-95, объем этого абзаца не менее 70 слов и не более 200.

**Научная новизна** (или Практическая ценность): содержит 1-2 предложения, описывающих научную новизну исследования.

В конце статьи приводится название, ключевые слова и аннотация на английском языке.

Текст статьи (15000 минимум без учета Литературы – до 40000 символов) должен быть структурирован и включать следующие подзаголовки: введение и постановка цели, решение поставленной задачи, результаты и/или выводы. Разделы могут именоваться и иначе, их может быть больше. Текст без структуризации недопустим. Текст в Word рекомендуется дублировать в формате pdf.

Название статьи, ключевые слова, аннотация должны быть переведены на качественный английский язык (статья с машинным переводом отклоняется сразу без рассмотрения. Лучше не переводить, чем машинный перевод).

Строго не рекомендуются к публикации статьи, в которых отсутствует формализованное решение задачи.

Рисунки и таблицы должны быть пронумерованы последовательно в порядке упоминания в тексте, ссылки на них приводятся в круглых скобках, например: (рис.1), (табл.1). Рисунки дополнительными файлами предоставляются в графических форматах tiff или jpg, png с разрешением 300 dpi для размера в публикации.

Раздел Литература нумеруется в порядке, упоминаемом в тексте (примеры ссылок по тексту: [1], [2, 5], [3, с. 123]). Рекомендованное количество литературных источников: 10-25. Настоятельно рекомендуется ссылаться на журнальные статьи, представленные в elibrary.ru или иных научных базах за последние 5 лет (Требование ВАК). Запрещается ссылаться на неиндексируемые литературные источники, как-то: стандарты и анонимные публикации, а также на ненаучные источники (например, Википедию, газеты). Литературный источник приводится строго по ГОСТ Р 7.0.5-2008 либо как он отображается в elibrary.ru (или Scopus и WoS), или источники без авторства. Ссылки на источники старше 5 лет могут быть в постраничных сносках, но не в разделе Литература. В постраничных сносках нет никаких ограничений.

ВАК рассматривает раздел Литература как место дискуссии автора статьи с авторами источников. Какая дискуссия может быть с безымянным текстом или с ГОСТом, Постановлением органа власти, нормативным документом? Все ссылки на них в постраничные сноски.

Статьи направляются на почту editor.tis@yandex.ru с заключением о возможности открытого опубликования.

<sup>1</sup>Максимов Петр Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационной безопасности Краснодарского высшего военного училища имени генерала С.М. Штеменко, г. Краснодар. E mail: monitorlaw@yandex.ru (точку после почты не ставить)

<sup>2</sup>Панфилов Петр Борисович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры финансовой безопасности Московского государственного юридического университета имени О.Е. Кутафина, г. Москва, Россия. E mail: prb@mail.ru (точку после почты не ставить)

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications, Registration Certificate PI № FS77-88069 от 16.08.2024

**Editor-in-Chief**

Vasily IVANOV, *Ph.D., Ass. Professor, Moscow*

**Chairman of the Editorial Council**

Alexander RUBIS, *Ph.D., Moscow*

**Assistant Editor-in-Chief**

Grigory MAKARENKO, *Senior Research Fellow, Moscow*

**Editorial Board**

Maxim, PYLINSKY *Dr.Sc., Professor, Belarus*  
Gennady RYZHOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*  
Yuri STARODUBTSEV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*  
Evgeny KHARCHENKO, *Ph.D., Professor, Moscow*

**Editorial board**

Mikhail BUINEVICH, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*  
Evgeny GLUSHANKOV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*  
Sergey IVANOV, *Dr.Sc., St. Petersburg*  
Alexander KOZACHOK, *Dr.Sc., Ass. Professor, Orel*  
Sergey KOROBKA, *Dr.Sc., Moscow*  
Andrey KOSTOGRYZOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*  
Sergey MAKARENKO, *Dr.Sc., Ass. Professor, St. Petersburg*  
Alexey MARKOV, *Dr.Sc., Ass. Professor, Moscow*  
Anatoly RYZHKOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*  
Nikolay SAVISHCHENKO, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*  
Igor SIVAKOV, *Dr.Sc., Moscow*  
Vladimir TSIMBAL, *Dr.Sc., Professor, Serpukhov*  
Oleg FINKO, *Dr.Sc., Professor, Krasnodar*

**Founder and publisher**

Federal State Budgetary Institution «16 Central Research and Testing Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation

Signed to the press on 30/04/2025.

The total circulation is 120 copies. The price is free Postal address: 1st Rupasovsky lane, 1, 141006, Mytishchi, Moscow region, Russia

E-mail: editor.tis@yandex.ru Tel.: +7 (995) 153-43-88.

The requirements for the manuscripts are posted on the website: <https://telemil.ru/>

# CONTENTS

**CONGRATULATION**

S.A. Anishchenko, V.S. Safanyuk.....2

**MILITARY CONTROL, COMMUNICATIONS AND NAVIGATION SYSTEMS**

**PRINCIPLES OF OPERATION OF A WIRELESS DATA TRANSMISSION NETWORK WITH FALSE SOURCES OF RADIO EMISSION**

Chudnov A. M., Kurashev Z.V.....4

**INTERFERENCE IMMUNITY OF SIGNALS WITH PROGRAMMED FREQUENCY HOPPING AND FREQUENCY-INTERVAL CODING**

Lyashchenko S.A.....10

**PHYSICO-PLANIMETRIC METHOD OF FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE OPTICAL TRANSPORT NETWORK OF SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF DEVELOPMENT**

Usatsky V.A., Seleznev A.V., Volkov V.A.....19

**SYSTEM MODELING**

**A MODEL FOR ESTIMATING LOSSES OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT**

Maniluk E.P., Grechishnikov E.V., Grechishnikova T.A.....25

**CONTROL AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES**

**PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM AND MEANS OF COMMUNICATION OF THE US ARMY**

Lukyanchik V.N., Sorokin K.N.....31

**TECHNICAL SUPPORT OF CONTROL AND COMMUNICATION SYSTEMS**

**IMPROVEMENT OPERATIONAL EFFICIENCY OF TECHNICAL RECONNAISSANCE OF MILITARY COMMUNICATIONS EQUIPMENT**

Vylkov A.S., Shatkov V.Yu.....40

**MILITARY COMMAND AND CONTROL AND COMMUNICATION SYSTEMS**

**PROPOSALS FOR MODERNIZATION OF THE PROTOCOL FOR MONITORING TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT OF A SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION CENTER**

Bogovik A.V., Safiulov D.M.....53

**PROBABILISTIC MODEL FOR ESTIMATING THE STRUCTURAL CONNECTIVITY OF NETWORKS RADIO ENGINEERING SYSTEMS IN CONDITIONS OF DESTRUCTIVE IMPACTS**

Yakushenko S.A., Shevyakov V.D., Sadovnikov V.E., Gladkikh D.S.....65

**MATHEMATICAL MODELING OF THE HEURISTIC METHOD OF RADIO FREQUENCY SPECTRUM CONTROL UNDER UNCERTAINTY**

Meshalkin V.A., Lukyanchik V.N., Konkov D.I., Polyakov D.N.....74

# TELECOMMUNICATIONS AND COMMUNICATIONS

№2 (05) 2025

DOI: 10.21681/3034-4050



[WWW.TELEMIL.RU](http://WWW.TELEMIL.RU)  
[EDITOR.TIS@YANDEX.RU](mailto:EDITOR.TIS@YANDEX.RU)