



ШОКИН Александр Геннадьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ,
КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ РЕШЕНИЯ КОММУНИКАЦИОННЫХ
ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКИ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ
ПРЕДСТАВЛЕНИИ ДАННЫХ**

Специальность 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Севастополь

2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» на кафедре «Информационные технологии и системы».

Научный руководитель

Моисеев Дмитрий Владимирович,

доктор технических наук, доцент, декан Факультета информационных технологий, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Официальные оппоненты:

Чуднов Александр Михайлович,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированных систем специального назначения» ФГКВОУ ВО «Военная Академия Связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного» МО РФ, г. Санкт-Петербург

Сухов Андрей Михайлович,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Киберфотоники» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), г. Самара

Ведущая организация

Закрытое акционерное общество «Институт телекоммуникаций», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «06» февраля 2026 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.393.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» по адресу: 299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, ауд. А501.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте ФГАОУ ВО СевГУ (www.sevsu.ru), на сайте Минобрнауки России (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации (в двух экземплярах), просим направлять в адрес Ученого совета университета.

Автореферат разослан «_27_» __11__ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., доцент



Доронина Юлия Валентиновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Одним из важнейших ресурсов современного мира является информация. Знаменитое высказывание «Информацию несут не только испещрённые буквами листы книги или человеческая речь, но и солнечный свет, складки горного хребта, шум водопада, шелест травы», принадлежащее В. М. Глушкову, сегодня, когда информация рождается из рук миллиардов пользователей вычислительной техники, имеет особую актуальность, при этом объем информации исчисляется не просто коротким набором нолей и единиц, но массивами данных, сотнями миллионов Тбайт ежедневно.

Наряду с мировым приоритетом развития информационных систем, к которым относятся системы информационной логистики, наша страна делает ставку на развитие информационных технологий, что отражается в ряде нормативно-правовых актов, среди которых следует отметить:

- Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р.
- Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. N 2115-р «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.»

Под информационной логистикой примем задачи сбора, обработки, хранения и распределения информации в производственно-хозяйственных системах и их окружении на основе логистических правил. Современные системы информационной логистики на государственном уровне идут по пути укрупнения и вовлечения всё большего числа участников, в том числе охватывая отдаленные и труднодоступные регионы нашей страны. Широкий территориальный охват и значительная отдаленность участников и компонентов систем информационной логистики (СИЛ) требует применения эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ. Для повышения надежности и помехозащищенности СИЛ предлагается применение вероятностного однолинейного однополярного представления данных.

Под качеством информационной логистики будем понимать поиск оптимальных значений многоиндексной структуры базовых функциональных коммуникационных задач информационной логистики:

- минимизация стоимостных показателей информационного трафика;
- минимизация временных затрат для информационного обмена;
- максимизация функций надежности сетевого трафика;
- максимизация показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

Степень разработанности темы исследования. Современным методам и подходам к решению коммуникационных задач информационной логистики посвящены работы следующих авторов: В.В. Поросенкова, А.В. Антоненкова, А.Л. Бимкулиной, В.А. Глушко, Р.С. Турлаевой, Г.И. Шепелина, Ю.Г. Кузменко, А.В. Мерзляка, Д.С. Гришина, К.А. Дмитрука, Т.А. Родкиной, Е.С. Некрасовой, Ю.А. Башкировой, В.А. Медведевой, К. Хэссига, Ю.С. Ежова, Г.А. Волкова, Л.Э. Егорова, К.В. Синютича, Д.В. Калитина, А.В. Скаткова. Однако исследования авторов не рассматривают вопросы оптимизации сетевой инфраструктуры систем информационной логистики. Работы в области вероятностных вычислительных систем и их моделей не новы, первые работы относятся к следующим авторам: В.С. Гладкому, В.В. Яковлеву, Р.Ф. Федорову, современные исследования выполнялись авторами Н.Е. Сапожниковым и Д.В. Моисеевым, а также научными коллективами под их руководством.

Цель диссертационного исследования. Повышение качества работы сетевых инфраструктур в системах информационной логистики путем применения многокритериальных оптимизационных моделей.

Для достижения поставленных целей были сформулированы и решены **задачи**:

1. Анализ проблематики решения коммуникационных задач информационной логистики.
2. Выбор критериев оптимизации, описание многокритериальной модели в дискретно-стохастической постановке и её численные решения.

3. Анализ вероятностной однолинейной однополярной формы представления данных, разработка помехоустойчивых методов обработки данных в виде вероятностных отображений, разработка и исследование характеристик и преимуществ быстрого вероятностного восстановления данных, представленных в виде вероятностных отображений.

4. Разработка системы принятия решений для коммуникационных задач информационной логистики на основе полимодельного комплекса.

5. Разработка программного комплекса для исследования характеристик быстрого вероятностного восстановления.

Научная новизна работы:

1. Впервые представлены математические модели для дискретно-стохастической оптимизации многоиндексной структуры базовых функциональных задач СИЛ.

2. Впервые предложен эффективный алгоритм ускоренного вероятностного преобразования, позволяющий применять вероятностную форму представления информации для решения коммуникационных задач информационной логистики.

3. Получил дальнейшее развитие алгоритм помехоустойчивого вероятностного кодирования информации, заключающийся в синдромном помехоустойчивом декодировании для вероятностного и псевдовероятностного представления информации.

4. На основе разработанных моделей впервые построен программный полимодельный комплекс для поддержки принятия решения ЛПР для решения коммуникационных задач информационной логистики.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Сформулированы математические модели в дискретно-стохастической постановке для оптимизации многоиндексных структур базовых функциональных коммуникационных задач информационной логистики.

2. Расширен набор методов помехоустойчивого кодирования для вероятностного однолинейного однополярного представления данных, позволяющий при минимальных аппаратно-технических решениях многократно сократить время, затрачиваемое на передачу данных, представленных в вероятностной форме, а также время, необходимое для восстановления передаваемого значения.

3. Предложена система поддержки принятия решений ЛПР на основе разработанного полимодельного комплекса, для чего выполнено описание оценочной матрицы и использована геометрическая интерпретация результатов, позволяющая упростить принятие решения для ЛПР.

Практическая значимость работы состоит в том, что использование разработанных в диссертации моделей, методов и комплексов программ позволяет решать следующие задачи:

1. Разработанные модели многоиндексной оптимизации коммуникационных задач информационной логистики могут быть использованы как базовые, в которых количество критериев может быть изменено под особенности решаемых задач.

2. Предложенный метод быстрого вероятностного преобразования решает задачу цикломатической сложности вероятностного однолинейного однополярного преобразования и представления данных, повышая привлекательность таких систем, и может быть основой решения других классов задач, вероятностных вычислительных моделей.

3. Разработанный комплекс программ, реализующий алгоритмы быстрого вероятностного преобразования и помехоустойчивого кодирования может быть использован для применения вышеупомянутых методов в стеке протоколов ТСР/ІР.

4. Усовершенствованная модель быстрого вероятностного преобразования осуществляет точное восстановление без потери в точности, которая может быть использована для сжатия данных, представленных в вероятностной форме и для их шифрования и построения надежных, энергоэффективных, помехоустойчивых СИЛ.

5. Реализованный комплекс программ оптимизации информационной логистики может быть использован в системах принятия решений для ЛПР.

Методология и методы исследования: при выполнении работы за основу взята: теория множеств с применением методов дискретной математики, вероятностного преобразования информации, стохастических вычислений, построения аналитических и имитационных моделей сложных систем.

Объект исследования: процессы функционирования сетевых инфраструктур в системах информационной логистики.

Предмет исследования: математические модели, методы, алгоритмы и компьютерные программы оценки и оптимизации процессов функционирования СИЛ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели в дискретно-стохастической постановке для оптимизации многоиндексной структуры базовых функциональных коммуникационных задач информационной логистики [7-8, 19-20].
2. Метод быстрого вероятностного преобразования и комплекс программ для исследования характеристик быстрого вероятностного восстановления информации [1-6, 9-18].
3. Комплекс программ для решения коммуникационных задач информационной логистики в сетевых инфраструктурах СИЛ [21-27].

Степень достоверности подтверждается использованием при разработке моделей известных математических методов и результатами вычислительных и натурных экспериментов.

Внедрение результатов работы. Полученные научные результаты:

– внедрены в учебный процесс кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы» ФГАОУ ВО СевГУ при проведении лекционных занятий и практических работ по дисциплинам: «Электротехника – Электроника - Схемотехника», «Сети и телекоммуникации», «Проектирование встраиваемых компьютерных систем». Реализация результатов диссертационной работы позволила повысить качество учебного процесса, усовершенствовать методические материалы преподавания дисциплин для направлений 09.03.01 – «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.04 – «Программная инженерия».

– внедрены в ООО «ЦТО «К-СЕРВИС», что позволило повысить эффективность по следующим направлениям деятельности ООО «ЦТО «К-сервис»:

- повысить скорость принятия решений и их эффективность при проектировании телекоммуникационных сетей предприятий;
- внедрить энергоэффективные технологии первичных обработчиков информации систем автоматизации;
- внедрены разработки энергоэффективных программно-аппаратных комплексов.

Апробация. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 9 международных научно-практических конференциях, симпозиумах и форумах: Первая международная научная конференция «Измерения, контроль и диагностика в технических системах» (ВКДТС-2011), Винница, 2011 г.; I международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы прикладной физики» АППФ-2012, г. Севастополь, 2012 г.; «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2013», г. Севастополь, 2013 г.; «Прогрессивная техника, технология и инженерное образование-2013»: Международная научно-техническая конференция, Киев – Севастополь, 2013 г.; «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: г. Севастополь, 2021 - 2023 гг.»; «Дистанционные образовательные технологии: г. Ялта, 2022 г.»; Международной научно-практической конференции «Системы контроля окружающей среды – 2022»; AIP Conference Proceedings : 2, – Krasnoyarsk, 2022 г.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 27 работ, из них: 8 публикаций в изданиях, включенных в Перечень изданий ВАК РФ, и 2 публикации, индексированные в международной базе SCOPUS, 10 публикации в изданиях, входящих в перечень РИНЦ, а также 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из списка сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 175 страниц, 63 рисунка, 14 таблиц. Библиографический список включает 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, выполнена постановка цели и задач, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы главные научные результаты исследования и положения, выносимые на защиту. Дана краткая аннотация содержания диссертации по главам.

В первом разделе рассматриваются основные понятия информационной логистики, сферы ее применения и имеющиеся проблемы. Рассматривается современное положение в области цифровизации в РФ, направления ее развития, место РФ в мировом рейтинге.

В рамках данной главы произведен обзор проблематики информационной логистики на основе имеющегося опыта и научных трудов. Выполнен анализ стоимости внедрения систем информационной логистики и примерные затраты, необходимые для повышения надежности. Подчеркивается, что потери, связанные с простоем, многократно превышают вложения на организацию резервных каналов связи. Опираясь на актуальные проблемы, накопленные за время работы уже существующих систем, которые выявили их слабые стороны, выполнен выбор проблемной области информационной логистики. По имеющимся проблемам намечены актуальные направления, такие как системы принятия решения на базе моделей оптимизации параметров систем информационной логистики, а также развитие перспективных алгоритмов энергоэффективных методов вероятностной обработки данных.

Во втором разделе рассмотрены вопросы, посвящённые формированию математической модели оптимизации СИЛ. Существующие СИЛ и аналогичные системы имеют большую инфраструктуру (см. рис. 1), работа которой требует обеспечения заданного качества, уровня отказоустойчивости, надежности и помехозащищенности, при решении критических задач и задач, которые могут быть связаны с издержками и простоями. Кроме непосредственной сложности решения задач оптимизации информационной логистики стоит отметить необходимость генерировать актуальное, выверенное и быстрое решение.

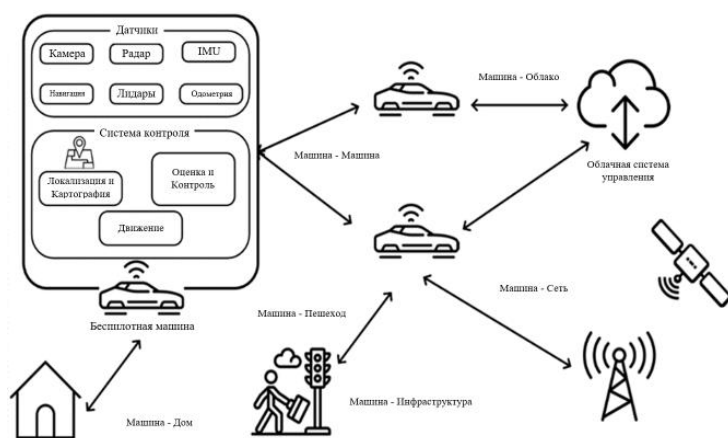


Рисунок 1 – Схема взаимодействия сетевых инфраструктур в СИЛ

Для опорных компонентов СИЛ – каналов информационного обмена, играющих ключевую роль в качестве работы всей системы, не описанными и не раскрытыми являются вопросы формирования математического обеспечения для решения задач векторной оптимизации, где целевыми функциями выступают: стоимость информационного обмена, оперативность доставки данных в каналах СИЛ, показатели безотказности работы и помехозащищённость системы.

В базовый набор полимодельного оптимизационного

комплекса функциональных задач СИЛ включен следующий набор моделей:

1. Первая группа, включает две модели, для которых в качестве задачи нахождения экстремума стоит поиск минимума:
 - модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока;
 - модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия;
2. Вторая группа, включает две модели, для которых в качестве задачи нахождения экстремума стоит поиск максимума:
 - модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика;
 - модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

Определены сквозные переменные, применяемые в описанных ранее моделях поиска функции экстремумов.

L – множество имеющихся помехоустойчивых кодов $\{l_u\}_L$, где $u \in U_0$;

N – множество имеющихся информационных каналов связи $N\{n_s\}$, где $s \in S_0$;

M – множество вершин – источников $M\{m_r\}$, где $r \in R_0$;

O – множество вершин – приемников $O\{o_h\}$, где $h \in H_0$;

R_0, S_0, H_0, U_0 – базовые множества используемых индексов, отражают описание движения единицы трафика по информационному тракту в функциональной последовательности – от источника r к приемнику o по каналу n с использованием помехоустойчивого кода u .

Ключевые переменные, формирующие исходный факторный базис:

- время передачи сетевого трафика в функциональной последовательности – t_{tshu} ;
- объём сетевого трафика в функциональной последовательности – I_{rshu} ;
- стоимость передачи единицы сетевого трафика в функциональной последовательности – C_{rshu} ;
- интенсивность потоков отказов: источника в функциональной последовательности – λi_{rshu} ; приемника в функциональной последовательности – λg_{rshu} ; канала связи в функциональной последовательности – λc_{rshu} .
- суммарный показатель надежности в функциональной последовательности – $p_{rstu}(t)$:

$$p_{rstu}(t) = p i_{rshu}(t) \cdot p g_{rshu}(t) \cdot p c_{rshu}(t), \quad (1)$$

где вероятность безотказной работы: для источника – $p i_{rshu}(t)$; для приемника – $p g_{rshu}(t)$; для канала связи – $p c_{rshu}(t)$.

Матрица X первоначально неизвестных величин x_{rshu} , подлежащих определению в результате решения комплекса оптимизационных задач. Элементы матрицы X являются булевыми величинами, т.е. $x_{rshu} \in B$, где B – множество булевых чисел, которые равны единице, если выбрано для реализации допустимое ребро в двудольном графе G рассматриваемой задачи, и равны нулю в противном случае. Структура матрицы X существенно неоднородна, геометрически ее можно интерпретировать как четырехмерный параллелепипед размерности R, S, H, U содержащий только координаты целочисленных точек, принадлежащих ему. Исходя из содержательного смысла для элементов матрицы X обязательно выполнение одновременно следующих условий равенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall u \in U: \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} x_{rshu} = 1 \\ \forall h \in H: \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \\ \forall s \in S: \sum_{r \in R} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \\ \forall r \in R: \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \end{array} \right. . \quad (2)$$

В структуре четырехмерной матрицы решений X каждый элемент x_{rshu} принадлежит множеству двоичных чисел B , это указывает на его уникальность в каждой размерности. С целью оптимизации записи моделей введено такое обозначение:

$$\left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in S} \left| \sum_{h \in H} \left| \sum_{u \in U} x_{rshu} \right. \right. \right. \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1. \quad (3)$$

В результате исследования базового случая с пуассоновскими потоками отказов (что является классическим подходом в анализе надежности технических устройств) мы пришли к следующему набору формул для определения вероятности безотказной работы:

$$\begin{aligned} p_{i_{rshu}}(t) &= \exp(-\lambda_{i_{rshu}}t) - \text{источника;} \\ p_{g_{rshu}}(t) &= \exp(-\lambda_{g_{rshu}}t) - \text{приемника;} \\ p_{c_{rshu}}(t) &= \exp(-\lambda_{c_{rshu}}t) - \text{канала связи;} \\ p_{rshu}(t) &= \exp(-\lambda_{rshu}t) - \text{для полной функциональной последовательности, } r \in R, s \in S, h \in H, u \in U. \end{aligned}$$

В результате анализа информационного тракта передачи данных в составе компонентов, описанных выше, можно утверждать о слабой взаимосвязи отказов в них, учитывая это:

$$\forall u \in U: \lambda_{rshu} = \lambda_{i_{rshu}} + \lambda_{g_{rshu}} + \lambda_{c_{rshu}}. \quad (4)$$

Учитывая воздействие величин второго порядка малости, выражение для определения вероятности безотказной работы выглядит так:

$$P_{rshu} = \exp(-\lambda_{rshu} \cdot t_{rshu}) = 1 - \lambda_{rshu} \cdot t_{rshu}. \quad (5)$$

Вычислим общую стоимость при передаче от всех источников ко всем приемникам в один рабочий цикл системы:

$$\begin{aligned} C &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (c_{i_{rshu}} + c_{g_{rshu}} + c_{c_{rshu}}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu}, \end{aligned} \quad (6)$$

где стоимости для элементов в функциональной последовательности: $c_{i_{rshu}}$ – передатчика; $c_{g_{rshu}}$ – приемника; $c_{c_{rshu}}$ – канала связи.

Для функциональной последовательности рассчитано общее время, затрачиваемое на процесс передачи информации:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} = \\ &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (t_{i_{rshu}} + t_{g_{rshu}} + t_{c_{rshu}}) \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu}. \end{aligned} \quad (7)$$

Общая вероятность безотказной работы системы примет вид:

$$P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda_{i_{rshu}} - \lambda_{g_{rshu}} - \lambda_{c_{rshu}}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] \quad (8)$$

Так как помехоустойчивость системы является сложным комплексом решаемых задач, зависящих от множества факторов, общая помехоустойчивость K_{rshu} в функциональной последовательности рассмотрена как совокупность, зависящая от помехоустойчивости источника – KI_{rshu} , помехоустойчивости приемника – KG_{rshu} и помехоустойчивости канала связи – KC_{rshu} :

$$K_{rshu} = KI_{rshu} \cdot KG_{rshu} \cdot KC_{rshu}. \quad (9)$$

В процессе решения задач оптимизации становится очевидным, что данная запись сложна при выполнении вычислительных операций. Для упрощения вычислений операции умножения сделан переход к ее логарифмическому показателю:

$$\begin{aligned} KL_{rshu} &= \ln K_{rshu} = \ln (KI_{rshu} \cdot KG_{rshu} \cdot KC_{rshu}) = \\ &= \ln KI_{rshu} + \ln KG_{rshu} + \ln KC_{rshu} = KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu}. \quad (11)$$

Модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач

Модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока

В рамках данной модели требуется найти такой набор элементов матрицы X , который обеспечивает минимальную стоимость передачи данных C , соблюдая при этом ограничения по: длительности передачи информации, показателям надежности системы и уровню помехоустойчивости, а также удовлетворяя условию:

$$\begin{aligned} C &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} c_{rshu} \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cg_{rshu} + cc_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (12)$$

учитывая ограничения:

$$\left\{ \begin{aligned} T &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tg_{rshu} + tc_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} < T_0 \\ P &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0 \\ K &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\ &\left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in S} \left| \sum_{h \in H} \left| \sum_{u \in U} x_{rshu} \right| \right| \right| \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Решение данной задачи позволяет выработать оптимальную стратегию распределения каналов в сети, обеспечивая минимальные затраты телекоммуникации, полностью удовлетворяющие требованиям к надёжности соединения, устойчивости к помехам и скорости передачи данных между всеми участниками системы.

В диссертации аналогичным образом получены модели минимизации временных потерь (Т-модель), максимизации надежности (Р-модель) и максимизации помехоустойчивости (К-модель).

Предложенные модели формируют класс оптимизационных задач с булевыми переменными и многоиндексным представлением. Для небольших размерностей возможно приведение данных моделей к двухиндексному формату, что открывает возможность применения типовых алгоритмов комбинаторной оптимизации. Масштабирование задач влечет необходимость создания особых методов, опирающихся на вероятностные модели, машинное обучение и современные технологические инновации.

Математические модели оптимизации информационной логистики в стохастической постановке

Для построения моделей выбрано представление случайных величин в виде математического ожидания, поэтому необходимо формализовать стохастические модели поиска экстремумов стоимостных показателей информационного потока; временных потерь обеспечения информационного взаимодействия; надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика и модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

Стохастическая модель поиска экстремума временных потерь обеспечения информационного взаимодействия

В данной модели величина t_{rshu} характеризуется случайным распределением с соответствующим МО. Учитывая это, для объема времени передачи сетевого трафика МО примет вид – $M[t_{rshu}]$.

В результате исследования ТМ-модели сформирована представленная ниже целевая функция, ориентированная на минимизацию критерия объема для времени передачи сетевого трафика:

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} M[t_{rshu}] \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min_{x_{rshu} \in X}. \quad (14)$$

Разложив случайную величину Т на сумму независимых случайных величин, учитывая свойства линейности и переход к более простым вычислениям МО:

$$M[t_{rshu}] = m[ti_{rshu}] + m[tg_{rshu}] + m[tc_{rshu}]. \quad (15)$$

Перепишем стоимостную целевую функцию (20) показателей информационного потока с учетом вышесказанного:

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (m[ti_{rshu}] + m[tg_{rshu}] + m[tc_{rshu}]) \cdot M[t_{rshu}] \cdot M[i_{rshu}] \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min_{x_{rshu} \in X}. \quad (16)$$

Определим набор ограничений стоимостных характеристик, безотказной работы и помехоустойчивости кодов для полученной целевой функции:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cg_{rshu} + cc_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0 \\ K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \end{array} \right. \quad (17)$$

В диссертации аналогичным образом получены стохастические модели минимизации стоимостных показателей информационного потока (СМ-модель), максимизации надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика (РМ-модель) и максимизации показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений (КМ-модель).

Таким образом, алгоритм структурного синтеза сетевых инфраструктур СИЛ сводится к формированию матрицы модельных решений $X_{i,g}$,

$$X_{ig} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,g} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,g} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где $x_{i,g}$ - бинарное значение использования канала для передачи от i -ого источника g -му приёмнику.

Введём понятие директивного такта ΔT промежуток времени, через который производится перерасчёт матрицы модельных решений $X_{i,g}$.

В случае если значение ΔT выбирается достаточно большим, то получаемые решения далеки от оптимальных в связи с возрастанием погрешности ΔG^* .

В случае если значение ΔT выбирается достаточно малым, становится очевидным, что часть ресурсов системы будет задействована на частый перерасчёт матрицы модельных решений $X_{i,j}$, что в свою очередь приведёт к появлению потерь D при такте ΔT .

Становится очевидным, что необходимо найти минимум функции потерь F :

$$F = C\Delta T + D\Delta T \rightarrow \min \quad (19)$$

Решение оптимизационной задачи позволит выбрать оптимальное значение директивного такта ΔT , при котором потери будут минимальными.

Далее алгоритм структурного синтеза сетевых инфраструктур СИЛ заключается в решении оптимизационной задачи по четырём критериям (стоимость передачи информации – C ; время доставки сообщений – T ; помехоустойчивости – K ; вероятность безотказной работы – P) при трёх ограничениях (см. рис. 2).

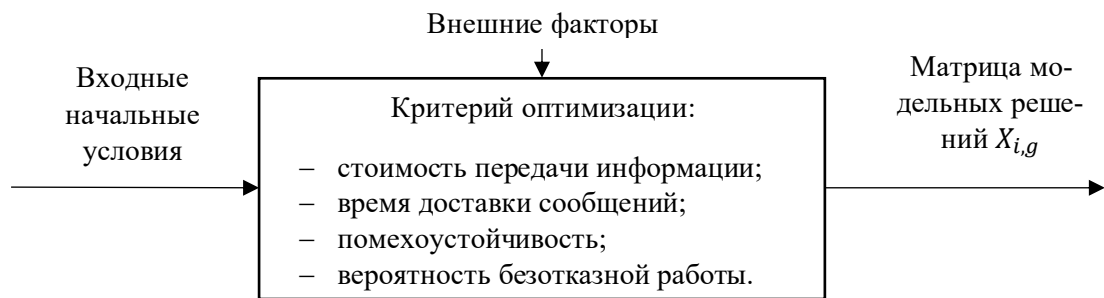


Рисунок 2 – Решение оптимизационной задачи формирования матрицы модельных решений $X_{i,g}$ в зависимости от выбранного критерия

Рассмотрим пример решения оптимизационной задачи формирования матрицы модельных решений $X_{i,g}$ при выбранном критерии оптимизации – стоимость передачи информации (C).

Далее выбирается целевая функция $C \rightarrow \min$ и система ограничений:

$$\begin{cases} T_{+1} \leq T \\ K_{+1} \leq K \\ P_{+1} \leq P \end{cases} \quad (20)$$

Стандартными методами решения задач линейного программирования находится решение данной задачи $X1_{i,g}$, после чего выбирается следующий критерий, находится решение $X2_{i,g}$ и т.д.

После чего полученные матрицы $X1_{i,g}, X2_{i,g}, X3_{i,g}, X4_{i,g}$ преобразуем в вектора $\overline{X1_{i*g}}, \overline{X2_{i*g}}, \overline{X3_{i*g}}, \overline{X4_{i*g}}$.

Между полученными векторами находим расстояние Хемминга, далее в цикле пытаемся минимизировать расстояние Хемминга для получения оптимального решения.

В третьем разделе с помощью численных методов выполняется анализ вероятностного однолинейного однополярного отображения информации для повышения надежности и помехоустойчивости сетевых инфраструктур в СИЛ.

Вероятностное преобразование информации или представление дискретных сигналов в виде вероятностных отображений в общем случае заключается в процессе преобразования путем многократного сравнения преобразуемого значения и вспомогательного случайного (или псевдослучайного) сигнала, в результате чего формируется ряд вероятностного отображения (ВО), состоящий из результатов выполнения операции компарации преобразуемой величины и вспомогательного сигнала.

Описание процесса преобразования информации в ВО принимает вид:

$$p'_{ij} = \begin{cases} \forall a_i \geq R_j, 1 \\ \forall a_i < R_j, 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$P' = \{p'_{i1}, p'_{i2}, p'_{i3}, \dots, p'_{ij}, \dots, p'_{ik}\}; \quad (22)$$

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_n\}; \quad (23)$$

где i – количество входных величин для выполнения вероятностного преобразования $i = \overline{1, n}$;
 n – количество ВО;
 p'_{ij} – j -е значение ВО из множества (22);
 a_i – i -е преобразуемое значение из ряда преобразуемых величин (23);
 j – цикл вероятностного преобразования $j = \overline{1, k}$;
 k – количество статистических испытаний;
 r_j – произвольное значение из ряда:

$$R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{ik}\}. \quad (24)$$

Процесс восстановления информации из ВО определяется как отношение суммы единичных значений в ВО к числу статистических испытаний:

$$a_i^* = \{M[p'_{ij}]\}^* = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k p'_{ij}. \quad (25)$$

Помехоустойчивость вероятностного преобразования

На основе численных методов был произведен расчет зависимости помехоустойчивости и количества разрядов ВО. Если представить, что для представления в виде ВО будет принят 128-символьный алфавит (ASCII), то для обеспечения погрешности в 0.39% количество циклов преобразования ВО должно быть не менее 177913, что значительно увеличивает время обработки и передачи информации, представленной в виде ВО.

Учитывая вышесказанное, рассчитывая, что осуществляется обеспечение погрешности в 0.39%, ВО будет не чувствительно к искажению около 700 разрядов ВО.

Вероятностное синдромное помехоустойчивое декодирование

Примем, что синдром ошибки S_i в общем виде – это вектор, вычисляемый на приемной стороне декодирующим устройством

$$S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, \dots, s_{ij}, \dots, s_{ik}\}. \quad (26)$$

где: s_{ij} – вычисленное значение синдрома.

После нахождения $a_{i_{\text{ош}}}^*$ производится хранение входной последовательности $p'_{\text{ош}ij}$ на k тактов, пока не будет найдено $a_{i_{\text{ош}}}^*$, после чего, имея R_i , повторяющие на вероятностном преобразователе, операцию преобразования необходимо выполнить еще раз, получив $p'_{\text{в}ij}$ и сложив по модулю 2 без переноса соответствующие разряды $p'_{\text{ош}ij}$, получим S_i синдром ошибки.

Нахождение значение разряда синдрома s_{ij} примет вид:

$$s_{ij} = p'_{\text{ош}ij} \oplus p'_{\text{в}ij}, \quad (27)$$

где $p'_{\text{ош}ij}$ – значения ВО, полученные из канала связи с ошибками;

$p'_{\text{в}ij}$ – значения ВО, полученные в результате повторного преобразования $a_{i_{\text{ош}}}^*$ с конгруэнтными значениями R_i преобразуется в:

$$p'_{\text{в}ij} = \begin{cases} \forall a_{i_{\text{ош}}}^* \geq R_j, 1 \\ \forall a_{i_{\text{ош}}}^* < R_j, 0 \end{cases} \quad (28)$$

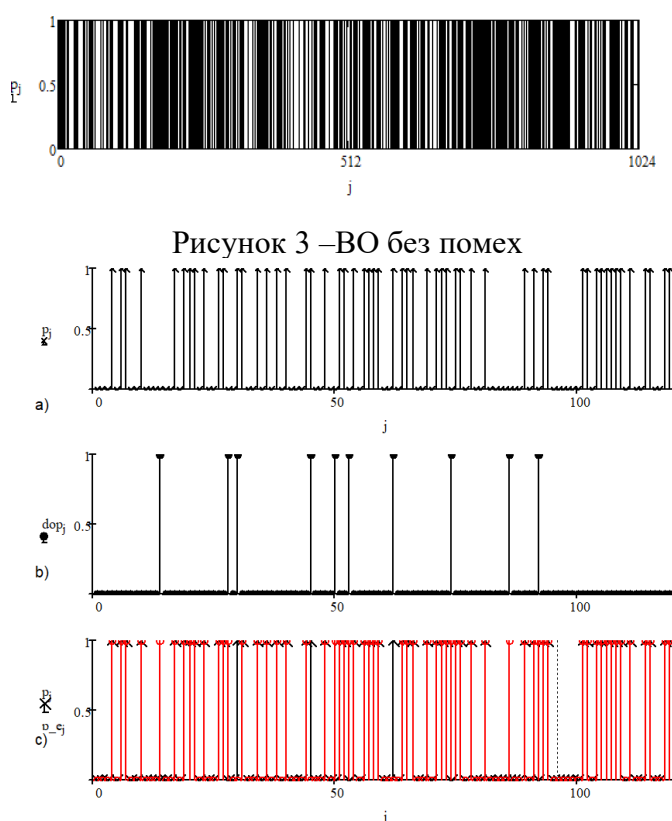


Рисунок 3 –ВО без помех

Процесс исправления ошибки при помощи синдрома заключается также в побитовом сложении по модулю два без переноса s_{ij} с принятыми значениями ВО $p'_{\text{ош}ij}$

Для представления описанного процесса рассмотрено ВО в графическом виде. Полученное ВО p'_{ij} отображено графически на рисунке 3. На графике 3 изображены 1024 разряда ВО преобразуемого значения $a_i = 42$, нормированного в единичном диапазоне, при диапазоне измерения значений от 0 до 100. При передаче информации, представленной в виде ВО по каналам связи без помех, полученный синдром будет равен 0, что в свою очередь будет свидетельствовать об отсутствии ошибки.

Если рассмотреть часть ряда ВО, подверженного воздействию помехи, где для наглядности взяты первые 120 разрядов, в которых случайным образом допущены искажения при передаче по каналу связи (см. рис. 4).

Рисунок 4 – Графическое отображение ВО при прохождении через канал связи с помехами

Значения ВО p'_{ij} (p_j на графике), поступающие в канал связи, изображены на рисунке 4 а); значения помехи (dop_j на графике), влияющие на передаваемые значения ВО, изображены на рисунке 4 б). Наглядна разница между значениями ВО на входе в канал связи p'_{ij} (p_j на графике) и выходе

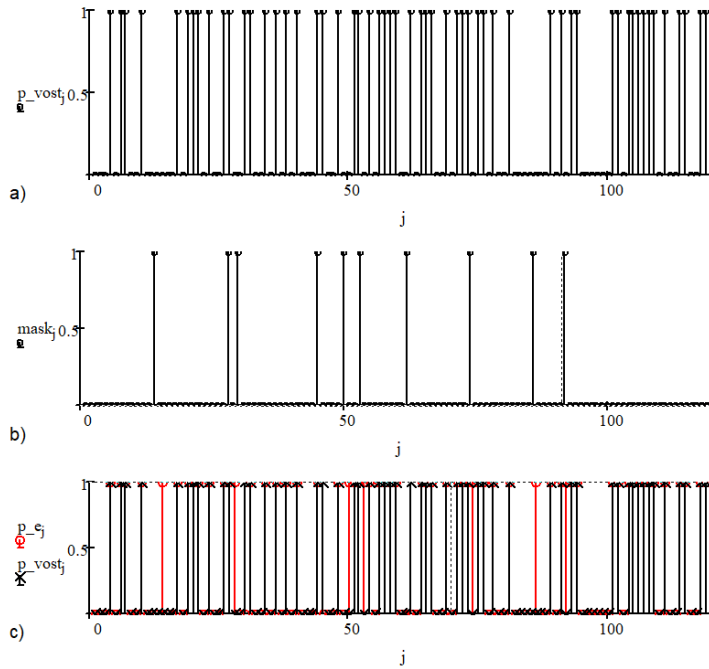


Рисунок 5 – Графическое отображение работы схемы с множественным восстановлением ошибки

ошибок, и в том и другом случае их количество равно 10. Процесс формирования синдрома на основании принятых значений ВО $p'_{\text{ош}ij}$ и $p'_{\text{в}ij}$ можно видеть на рисунке 5 с).

Наравне с полученной эффективностью работы схемы исправления множественной ошибки стоит отметить, что данная схема, несмотря на свою крайнюю простоту и малую аппаратную емкость, в случае наличия ошибки в передаваемых значениях ВО, дополнительно увеличит время от получения ВО до его конечной выдачи получателю минимум в два раза. Увеличение времени связано с необходимостью дважды выполнять операцию по вероятностному преобразованию: в первый раз для получения $a_{i\text{ош}}^*$, а второй раз после обработки синдромом полученных значений ВО для получения $a_i^* = a_i$.

Быстрое вероятностное преобразование

Дальнейшее исследование свойств ВО с учетом синхронности ГПСЧ источника и приемника, а также с учетом конкретных ВО и выделения закономерностей позволило выявить дополнительные свойства и возможности, такие как быстрое вероятностное преобразование.

В ходе изучения процесса вероятностного преобразования используемая формула разделена на две части, отвечающие за «0» и «1» в разрядах ВО.

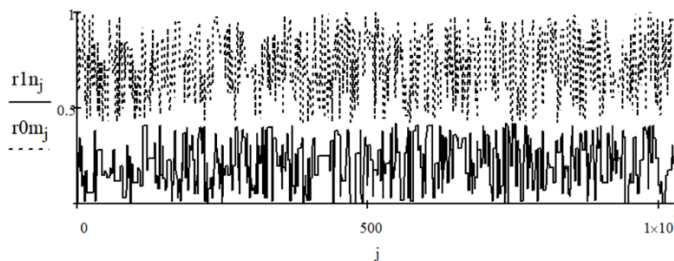


Рисунок 6 – Распределение вспомогательной случайной величины в зависимости от принимаемого ВО

$p'_{\text{ош}ij}$ ($p_{\text{е}j}$ на графике).

Как видно из рисунка 5, в результате прохождения через канал связи 10 разрядов ВО были подвержены влиянию ошибок.

В результате работы схемы с множественным восстановлением ошибки были получены значения восстановленного ВО $p'_{\text{в}ij}$ ($p_{\text{вост}j}$ на графике) рисунок 5 а).

Результатом сложения по модулю 2 полученного значения ВО с ошибкой $p'_{\text{ош}ij}$ ($p_{\text{е}j}$ на графике) и ВО, полученного в результате работы схемы восстановления $p'_{\text{в}ij}$ ($p_{\text{вост}j}$ на графике), получаем синдром ошибки s_{ij} ($mask_j$ на графике) рисунок 5 б).

Сравнив рисунки 4 б) и 5 б), видно, что количество ошибок в канале связи соответствует массе синдрома

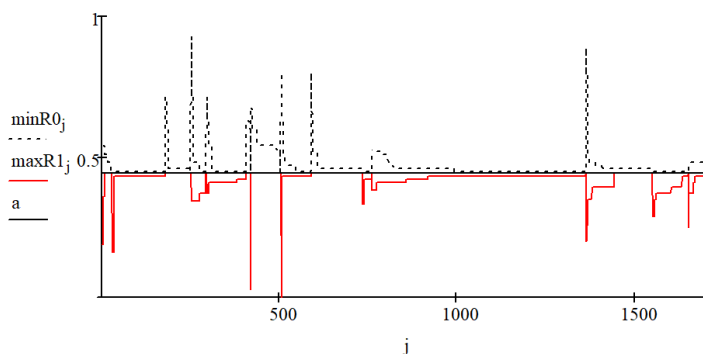


Рисунок 7 – Нахождение $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$ при последовательном поступлении ВО относительно преобразуемой величины

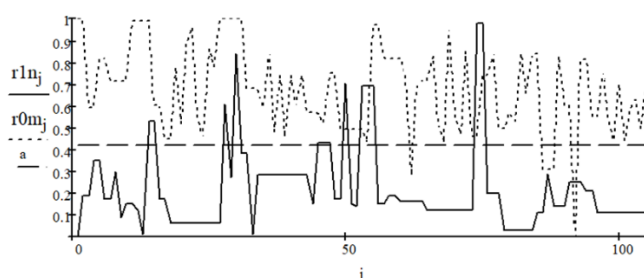


Рисунок 8 – Распределение вспомогательной случайной величины в зависимости от принимаемого ВО с ошибкой

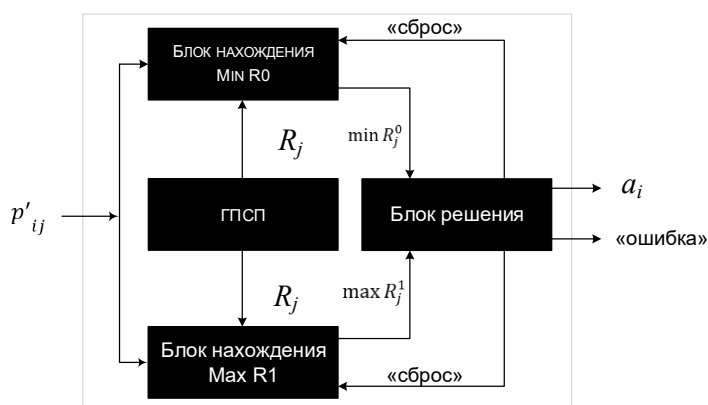


Рисунок 9 – Блок-схема быстрого вероятностного восстановления с определением ошибки

ответствовать шагу квантования входного значения в диапазоне изменения вспомогательной случайной величины (см. рис. 7):

$$\min R_j^0 - \max R_j^1 = \Delta \quad (31)$$

Наличие пересечения в принимаемых множествах ВО приведет к нарушению выражений (29, 30), а шаг квантования Δ в случае ошибки будет принимать отрицательные значения. На рисунке 8 изображен случай, когда в принимаемом значении ВО допущены ошибки в результате формирования дополнительных множеств R_j^1 и R_j^0 . Видно, что кривые множеств пересекаются в точках нахождения ошибок относительно значения преобразуемой величины.

Два набора $R_j^1 \in p'_{ij} = 1$ и $R_j^0 \in p'_{ij} = 0$ представлены графически на рисунке 6, из которого видно, что значения ГПСЦ, при котором ВО $R_j^1 \in p'_{ij} = 1$ ($r1n_j$ по графику), расположились в нижней части графика, а значения ГПСЦ, при котором ВО=0, расположились в верхней части графика ($r0m_j$ по графику), при этом было преобразовано $a_i=42$, нормированное в единичном диапазоне, в 1024 разряда ВО, при диапазоне изменения входной величины от 0 до 100.

Как видно из графического представления, в случае приема значений ВО без ошибок множества R_j^1 и R_j^0 не будут иметь пересечений:

$$R_j^1 \cap R_j^0 = \emptyset \quad (29)$$

Необходимо отметить и то, что при безошибочной передаче значений ВО справедливо выражение:

$$\min R_j^0 > \max R_j^1 \quad (30)$$

Исследование значений каждого из множеств и их отношений с учетом равномерности для ГПСЦ определяет свойство, согласно которому разница между минимальным значением из множества $\min R_j^0$ вспомогательной случайной величины, при этом значение ВО принимает нулевое значение, и максимальное из множества $\max R_j^1$ вспомогательной случайной величины, при котором ВО=1, при условии, что количество генераций ГПСЦ будет достаточно велико по отношению к количеству, на которые разбит генерируемый интервал, разница между экстремумами будет со-

Предлагается следующая схема решения быстрого вероятностного восстановления с определением ошибки (рисунок 9). Предложенная схема на рисунке 9 при использовании 16-разрядных ГПСЧ, с учетом применения двух дополнительных регистров хранения, трех компараторов, схемы вычитания и вспомогательной логики, не превышает 350 логических элементов.

Как и в схеме вероятностного устройства с множественным исправлением ошибки (см. рис. 9), в блок-схеме быстрого вероятностного восстановления основу и ключевую роль играет использование конгруэнтных ГПСЧ.

Вариантный анализ показал, что в определенных ситуациях предложенное быстрое вероятностное восстановление сопоставимо с существующими решениями, а некоторые превосходит.

В четвертом разделе разработаны комплексы программ на основе полученных математических моделей оптимизации информационной логистики и модели быстрого вероятностного восстановления.

Для помощи принятия решения предложена геометрическая интерпретация проекции че-

Построение моделей дискретной оптимизации

М: 1, N: 9, O: 2, L: 10, I(rshu): 3, V(rshu): 6, t(rshu): 3, C(rshu): 8, @l(rshu): 5, @c(rshu): 8, @g(rshu): 3, Kl(rshu): 5, KC(rshu): 5, KG(rshu): 5

Выбор модели: ☒ С модель, ☐ Т модель, ☐ Р модель, ☐ К модель

Заполнить случайно, Рассчитать случайно, Рассчитать изменяя только массив X, Записать данные в файл, Загрузить из файла, Очистить поле, ЗАКРЫТЬ

С = 16, T = 23, P = 20,50, Q = 21,82
 С = 17, T = 19, P = 23,66, Q = 27,39
 С = 25, T = 21, P = 38,17, Q = 29,22
 С = 44, T = 56, P = 27,45, Q = 46,00

Рисунок 10 – Оптимизация некоторой системы по заданным критериям

Таблица 1 – Полученные значения моделей оптимизации

С-модель		Т-модель		Р-модель		К-модель	
С	16,00	С	17,00	С	25,00	С	44,00
Т	23,00	Т	19,00	Т	21,00	Т	56,00
Р	20,50	Р	23,66	Р	38,17	Р	27,45
К	21.82	К	27.39	К	29.22	К	46.00

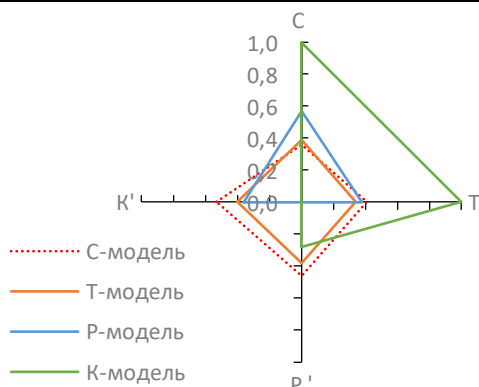


Рисунок 11 – Геометрическая интерпретация оптимизации системы по заданным моделям

ласти высшего уровня в области низшего уровня.

тырехмерного критериального пространства на двумерную декартовую плоскость СРТКО с взаимно перпендикулярными осями, причём оси К и Р рассматриваются не только с отрицательным знаком, поскольку для них решается задача на максимизацию, но и взяты их обратные значения от полученных показателей:

$$\begin{aligned} K' &= 1 - K \\ P' &= 1 - P \end{aligned} \quad (32)$$

Тогда можно утверждать, что идеальной системе соответствует точка, находящаяся в начале координат. Если выполнить центрирование переменных критериального пространства с последующей нормализацией критериев, то в качестве области принимаемых решений получен единичный квадрат, где все возможные решения отображаются точками, лежащими внутри этого квадрата. Точки этого квадрата образуют множество Da. Внутренние квадраты, содержащиеся последовательно один в другом, соответствуют множествам Ds, De, Dopt.

Среди всех допустимых решений есть решения, которые лежат внутри этого квадрата. В нём можно выделить область удовлетворительных решений, эффективных решений и оптимальных решений. При этом при полном сравнении систем наблюдается строгое включение области высшего уровня в области низшего уровня.

Сделан расчет для некоторого набора входных значений параметров оптимизационных моделей, результат приведен на рисунке 10 и в таблице 1.

Полученные данные по значениям С-модели, Т-модели, Р-модели, К-модели сведены в табл. 1.

Для графической интерпретации выполнены нормирования параметров в единичном диапазоне и для Р и К взяты обратные значения (см. табл. 2).

Таблица 2 – Нормированные значения моделей оптимизации

С-модель	Т-модель	Р-модель	К-модель
С	0,36	С	0,39
Т	0,41	Т	0,34
Р'	0,46	Р'	0,38
К'	0,53	К'	0,40
С	0,57	С	1,00
Т	0,38	Т	1,00
Р'	0,00	Р'	0,28
К'	0,36	К'	0,00

наборе хотя и не являются сравнимыми с точки зрения параметров оптимизации, однако показывают легкость выявления неоптимальных решений 4 – К-модели, по причине выхода точки за пределы рассматриваемых областей, при этом данные С-модели, 2 – Т-модели, 3 – Р-модели находятся в областях, допустимых и удовлетворительных в первом квадрате, и в областях, допустимых, удовлетворительных и эффективных в третьем квадрате.

Для понимания механизмов многоуровневой оптимизации в работе рассмотрен простейший пример двухуровневой оптимизации СИЛ, для которой:

- на первом уровне выполняется оптимизация по значениям частных критериев и формирование картежей альтернативных вариантов реализации СИЛ: «С, 1-Р, Т, 1-К»;
- на втором уровне происходит оптимизация распределения ресурсов (процессорного времени, памяти, ширины канала информационного обмена).

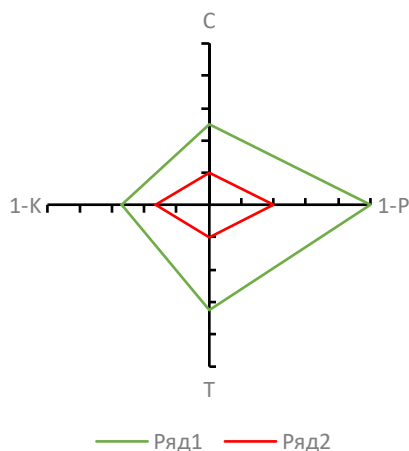


Рисунок 12 – Геометрическая интерпретация проекции четырехмерного критериального пространства

2 – минимально возможные значения критериев;

1 – текущее значение критериев до оптимизации.

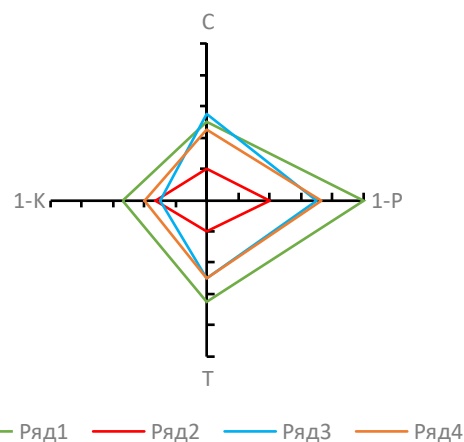


Рисунок 13 – Геометрическая интерпретация проекции четырехмерного критериального пространства, на I-м уровне оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена;

1 – текущее значение критериев до оптимизации;

2 – минимально возможные значения критериев;

3 – вариант оптимизации 1;

4 – вариант оптимизации 2.

I-й уровень оптимизации.

Для использования геометрической интерпретации рассматриваются проекции четырехмерного критериального пространства на двумерную декартову плоскость СРТКО с взаимно перпендикулярными осями, (см. рис. 12).

Как становится видно из рисунка 12, необходимо рассматривать разность площадей четырехугольников 1 и 2 и решать задачу на минимизацию данной разности. Причём все четырехугольники меньшей площади, чем 1, являются более эффективными при альтернативных вариантах реализации структурного синтеза каналов информационного обмена. Следует отметить, что в первую очередь следует рассматривать «равномерные» решения по критериям, когда каждый критерий находится внутри базового четырехугольника 2 (см. рис. 13).

Как следует из рисунка 13, четырехугольники, соответствующие решениям 3 и 4, имеют равную площадь, однако решение 4 является предпочтительнее, т.к. каждый его критерий находится внутри базового четырехугольника 2.

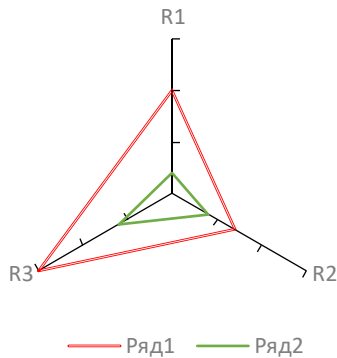


Рисунок 14 – Геометрическая интерпретация проекции трёхмерного критериального пространства, на II-м уровне оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена

II-й уровень оптимизации.

В задаче синтеза каналов сетевых инфраструктур СИЛ выделяются следующие виды ресурсов Rlj :

- процессорные устройства (процессорное время) $R1j$;
- информационные каналы (ширина пропускной способности) $R2j$;
- устройства памяти (объём выделяемой памяти) $R3j$.

Аналогично с I-м уровнем оптимизации необходимо рассматривать разность площадей, в данном случае симплексов 1 и 2,

и решать задачу на минимизацию данной разности (см. рис. 14).

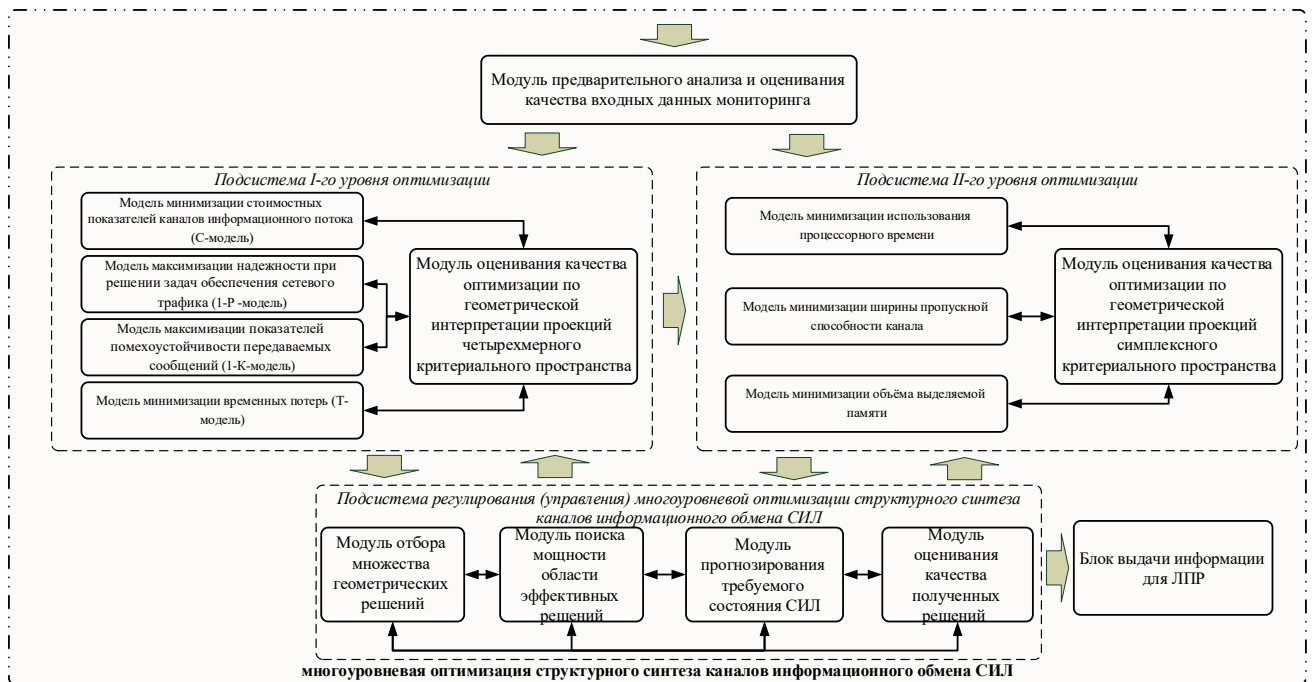


Рисунок 15 – Обобщенная структурно-функциональная схема многоуровневой оптимизации СИЛ

Аналогично все симплексы меньшей площади, чем 1, являются более эффективными при альтернативных вариантах реализации структурного синтеза каналов информационного обмена. Также в первую очередь следует рассматривать «равномерные» решения по критериям, когда каждый критерий находится внутри базового симплекса 2.

На рис. 15 представлена блок-схема двухуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств для систем контроля окружающей среды.

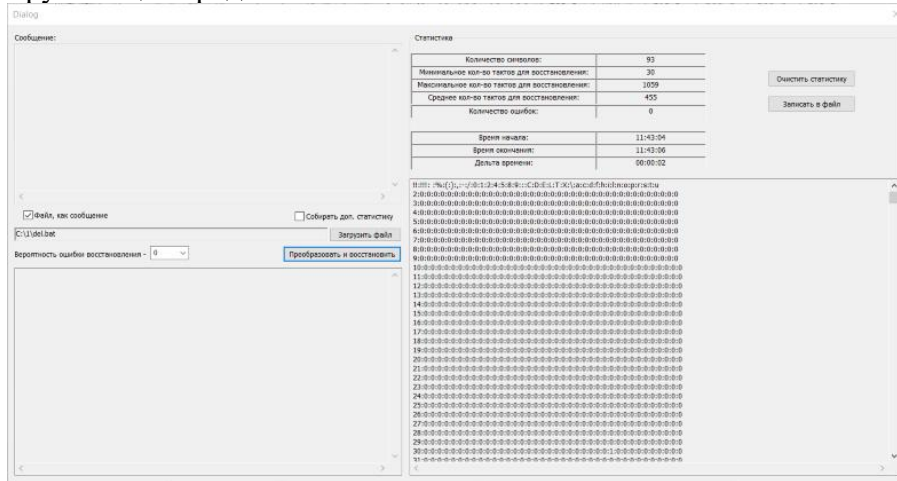


Рисунок 16 – Посимвольная статистика при обработке файла

При выполнении исследований характеристик быстрого вероятностного преобразования было выполнено быстрое преобразование с последующим восстановлением 14 720 579 символов. На рисунке 17 показано распределение необходимого количества циклов преобразования: по оси абсцисс расположено количество испытаний, а по оси ординат количество попаданий в данное количество испытаний.

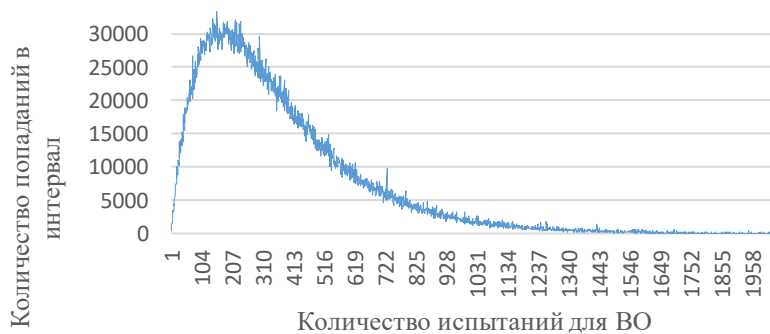


Рисунок 17 – Суммарный накопленный результат проведенных испытаний по количеству циклов обработки при быстром вероятностном восстановлении

восстановления.

Полученные данные позволяют с уверенностью утверждать, что применение быстрого вероятностного восстановления при использовании расширенного кода ASC II на 256 символов в 95% случаев будут восстановлены в 197 раз быстрее, чем в случае классического вероятностного восстановления для ASC II на 128 символов с обеспечением погрешности в 0.39%. При этом быстрое вероятностное преобразование осуществляет точное восстановление.

Предложенная методика позволяет повысить быстродействие обработки данных, представленных в вероятностной форме, при сохранении всех преимуществ вероятностного преобразования и специализированных вычислителей на их основе. Повышение скорости передачи вероятностно представленных данных и их восстановления в совокупности с малыми аппаратными

Для исследования свойств быстрого вероятностного преобразования был разработан комплекс программ, реализующий быстрое вероятностное преобразование на базе стека протокола TCP/IP, а также позволяющий выполнить исследование характеристик быстрого вероятностного восстановления информации, окно разработанного комплекса приведено на рисунке 16.

Согласно суммарно накопленным данным, в результате выполнения 14720579 быстрых вероятностных восстановлений (см. рис. 17) в 95% случаев пришлось на 896 циклов преобразования. При локализации максимумов от 84 до 309 циклов находятся значения с количеством попаданий преимущественно более 25000. В данной области локализовано более 43% от всех циклов

затратами и применением механизмов помехоустойчивости обуславливает не только актуальность исследуемой темы, но и качественно повышает возможности вероятностного представления, расширяя возможности его применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационного исследования разработаны и выполнены в виде комплексов программных средств математические модели, численные методы и алгоритмы, направленные на исследование, анализ и оптимизацию решения коммуникационных задач информационной логистики с целью повышения скорости принятия решений. Осуществлено их внедрение в ФГАОУ ВО СевГУ, ООО «ЦТО «К-СЕРВИС».

Среди полученных основных научных и практических результатов необходимо выделить следующие:

1. Выполнен анализ проблематики решения коммуникационных задач информационной логистики, в результате чего отмечена необходимость использования моделей, численных методов и комплексов программ для решения этих задач.
2. Осуществлен выбор критериев оптимизации, описание многокритериальной модели в дискретно-стохастической постановке; на основе выбранных критериев разработаны математические модели для дискретно-стохастической оптимизации многоиндексной структурой базовых функциональных коммуникационных задач информационной логистики: нахождения экстремумов стоимостных показателей информационного трафика, временных затрат информационного обмена, обеспечения функций надежности сетевого трафика, показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.
3. В результате выполненного анализа вероятностной однолинейной однополярной модели представления данных разработан новый помехоустойчивый алгоритм, предложена новая модель быстрого вероятностного преобразования, превосходящая по скорости восстановления классическую модель в 193 раза, а псевдовероятностную - минимум от 2,07 до 4,5 раза.
4. Выполнена разработка системы принятия решений для коммуникационных задач информационной логистики на основе разработанного впервые полимодельного комплекса для поддержки принятия решения ЛПР.
5. Разработан программный комплекс для исследования характеристик быстрого вероятностного восстановления, реализующий алгоритмы быстрого вероятностного преобразования и помехоустойчивого кодирования на основе протокола UDP из стека протоколов TCP/IP без ограничений на передаваемую информацию.

Полученные в результате выполнения диссертационной работы математические модели, численные методы и комплексы программ для решения задач систем информационной логистики могут быть дополнены или изменены по критериальному пространству в зависимости от требований решаемых задач. Их применение актуально в связи с растущей информатизацией и необходимостью перехода к новому технологическому укладу, когда скорость принятия решения и его качество играют главную роль при построении информационной инфраструктуры СИЛ.

Полученные модели быстрого вероятностного преобразования комплексно повышают качественные характеристики вероятностной однолинейной однополярной модели представления данных, позволяя применять вероятностную форму представления информации для решения коммуникационных задач информационной логистики. Результаты проведенного имитационного моделирования позволяют судить о 197-кратном повышении эффективности по сравнению с классическим прототипом и от 2,07 до 4,5 раза по сравнению с псевдовероятностным аналогом при преобразовании, а также при хранении и передаче информации в данной форме. Предложенный метод быстрого вероятностного преобразования нивелирует недостатки классического вероятностного преобразования, связанного с необходимостью обработки большого количества разрядов ВО, в связи с чем повышается актуальность применения вероятностных систем в целом. Выполненный вариантный анализ показал, что в определенных ситуациях быстрое вероятностное восстановление сопоставимо с LDPC-кодом, а по отношению к коду Рида-Соломона, Хэмминга, БЧХ данный показатель лучше на 14 – 78%. Перспективной является разработка на основе

быстрого вероятностного преобразования алгоритмов гаммирования с применением криптостойких конгруэнтных генераторов псевдослучайных чисел для повышения криптографической стойкости сетевых инфраструктур в СИЛ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шокин, А.Г. Построение преобразователя частота - вероятность / Н.Е.Сапожников, Д.В., Моисеев, Е.В.Скрябина, А.Г.Шокин // Сборник научных трудов СКУАЭИП. - 2010. - Вып. № 4 (36). - С. 217-222.
2. Шокин, А.Г. Преобразователь напряжение - вероятность / Н.Е.Сапожников, Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Вестник СевНТУ: сбор. науч. труд. - 2011. - Вып. 114. - С. 116-118.
3. Шокин, А. Г. Новые методы помехоустойчивого кодирования информации / А.Г.Шокин, Н.Е.Сапожников, Д.В.Моисеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2012. - Т. 6. - № 9(60). - С. 26-30.
4. Шокин, А.Г. Вероятностные вычислительные модели / Н.Е.Сапожников, Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, Ю.А.Барановский // Сб. науч. тр. СКУАЭИП. - Севастополь: СКУАЭИП. - 2013. - Вып. 1 (45). - С. 210- 215.
5. Шокин, А.Г. Вероятностное кодирование с множественным исправлением ошибок / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, Е.С.Серяк // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. - 2021. - № 2(14). - С. 51-58.
6. Dmitry Moiseev, Alexander Shokin; Probabilistic coding with multiple error corrections. AIP Conf. Proc. 22 June 2022; 2467 (1): 040008. <https://doi.org/10.1063/5.0092565>
7. Шокин, А.Г. Математическая модель оптимизации информационной логистики / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. - 2023. - № 3(23). - С. 50-62.
8. Шокин, А.Г. Математическая модель оптимизации информационной логистики в стохастической постановке / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Таврический вестник информатики и математики. - 2023. - № 3(60). - С. 67-82
9. Шокин, А.Г. Быстрое вероятностное преобразование / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, В.В.Козлов // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. - 2024. - № 2(26). - С. 49-56.
10. Шокин, А.Г. Исследование характеристик быстрого вероятностного восстановления / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, В.В.Козлов // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. - 2024. - № 2(26). - С. 81-89.
- Публикации в других изданиях:**
11. Шокин, А.Г. Исследование вероятностного кодирования с ускоренным мажоритарным декодированием / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, Е.С.Серяк // Modern Science. - 2021. - № 6-2. - С. 377-382.
12. Шокин, А.Г. Вероятностные вычислительные модели / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, А.А.Пахомова, О.С.Михайлова // Modern Science. - 2021. - № 5-2. - С. 164-168.
13. Шокин, А.Г. Применение вероятностного помехоустойчивого кодирования в каналах информационного обмена / Д.В.Моисеев, Н.Е.Сапожников, А.В.Скатков, А.Г.Шокин // Дистанционные образовательные технологии: материалы VII Международной научно-практической конференции, Ялта, 20-22 сентября 2022 года. - Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью Издательство Типография Ариал. - 2022. - С. 269-272.
14. Шокин, А. Г. Оценка времени восстановления преобразуемой величины из вероятностного отображения / Д. В.Моисеев, А.Г.Шокин // Системы контроля окружающей среды - 2022: тезисы докладов Международной научно-практической конференции. Конференция посвящена 300-летию Российской академии наук, проводится в рамках научно-технического сотрудничества Россия - АСЕАН, Севастополь, 08-11 ноября 2022 года. - Севастополь: ИП Куликов А.С. - 2022. - С. 34.

15. Шокин, А.Г. Оценка времени восстановления преобразуемой величины из вероятностного отображения / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, Е.В.Татурина // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы VIII межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 20-24 сентября 2022 года / Севастопольский государственный университет. - Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Севастопольский государственный университет. - 2022. - С. 94-97.

16. Шокин, А.Г. Применение вероятностного помехоустойчивого кодирования в системах передачи цифровой информации с обратной связью / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы VIII межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 20-24 сентября 2022 года / Севастопольский государственный университет. - Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Севастопольский государственный университет. - 2022. - С. 98-100.

17. Шокин, А.Г. Применение вероятностной формы представления данных для помехоустойчивой передачи информации / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, Е.С.Серяк // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, Ялта, 24-26 мая 2021 года / Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Гуманитарно-педагогическая академия (филиал). - Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью Издательство Типография Ариал. - 2021. - С. 135-139.

18. Шокин, А.Г. Разработка модуля вероятностного преобразования и восстановления информации / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы VII Межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 21-25 сентября 2021 года / Науч. редактор Б.В. Соколов. - Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Севастопольский государственный университет. - 2021. - С. 202-203.

19. Шокин А.Г. Математическая модель оптимизации информационной логистики / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Системы контроля окружающей среды - 2023: тезисы докладов Международной научно-практической конференции в рамках научно-технического сотрудничества Россия - АСЕАН, посвященной 300-летию Российской академии наук, Севастополь, 07-10 ноября 2023 года. - Севастополь: ИП Куликов А.С. - 2023. - С. 27.

20. Шокин, А.Г. Математическая модель оптимизации информационной логистики в стохастической постановке / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, Ю.Г.Шаталова, А.В.Пестрякова // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 19-23 сентября 2023 года. - Севастополь: Севастопольский государственный университет. - 2023. - С. 168-182.

Результаты интеллектуальной деятельности:

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665633 Российская Федерация. Модуль вероятностного преобразования и восстановления информации: № 2021664738: заявл. 21.09.2021: опубл. 30.09.2021 / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин, О.С.Михайлова, А.А.Пахомова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Севастопольский государственный университет.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616044 Российская Федерация. Программная модель вероятностного устройства для определения статистических характеристик случайного сигнала: № 2023614975: заявл. 16.03.2023: опубл. 22.03.2023 / Д.В.Моисеев, Е.В.Скрябина, А.Г.Шокин, А.С.Захаров; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Севастопольский государственный университет.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616132 Российская Федерация. Программа моделирования работы вероятностного коррелометра: № 2023614983: заявл. 16.03.2023: опубл. 22.03.2023 / Д.В.Моисеев, Е.В.Скрябина, А.Г.Шокин,

Ю.А.Барановский; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Севастопольский государственный университет.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616232 Российская Федерация. Программа моделирования работы вероятностных преобразователей сигнал - вероятностное отображение и анализа их характеристик: № 2023614962: заявл. 16.03.2023: опубл. 23.03.2023 / Д.В.Моисеев, Е.В.Скрябина, А.Г.Шокин, Д.А.Цофнас; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет».

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616454 Российская Федерация. Программа моделирования работы вероятностного арифметического устройства: № 2023614974: заявл. 16.03.2023: опубл. 28.03.2023 / Д.В.Моисеев, Е.В.Скрябина, А.Г.Шокин, Д.А.Цофнас; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет».

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665173 Российская Федерация. Программный комплекс быстрого вероятностного преобразования и восстановления информации: № 2025663983: заявл. 30.05.2025: опубл. 11.06.2025 / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет».

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665283 Российская Федерация. Полимодельный оптимизационный комплекс решения задач информационной логистики: № 2025663981: заявл. 30.05.2025: опубл. 11.06.2025 / Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет».