

На правах рукописи



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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент Моисеев Д.В.

Севастополь – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКИ.....	14
1.1. Текущая ситуация и анализ цифровизации в России	15
1.2. Обзор проблем решения задач информационной логистики	19
1.3. Стоимость внедрения СИЛ	23
1.4. Выбор проблемной области для решения актуальных задач информационной логистики.....	25
1.5. Выводы по главе	28
ГЛАВА 2. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ, ОПИСАНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ В ДИСКРЕТНОЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ	31
2.1. Полимодельный комплекс функциональных задач оптимизации информационной логистики.....	33
2.2. Информационное описание используемых идентификаторов.....	37
2.3. Матрица решений	39
2.4. Модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач	42
2.5. Математические модели оптимизации информационной логистики в стохастической постановке	46
2.6. Выводы по главе 2	54
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ И БЫСТРОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ	56
3.1. Представление дискретных сигналов в виде вероятностных отображений	

3.2. Оценка помехоустойчивости вероятностного преобразования	59
3.3. Вероятностное синдромное помехоустойчивое декодирование	63
3.4. Быстрое вероятностное преобразование	68
3.5. Вариантный анализ быстрого вероятностного преобразования	74
3.6. Выводы по главе 3	92
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКИ.	94
4.1. Система поддержки принятия решений ЛПР на основе полимодельного комплекса	95
4.2. Комплекс методик декомпозиции структурно-сложных систем	98
4.3. Комплекс программ оптимизации сетевой инфраструктуры СИЛ	104
4.4. Программный комплекс для исследования характеристик быстрого вероятностного восстановления.....	117
4.5. Выводы по главе 4	144
Заключение.....	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	149
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ	169
А.1 Программа моделирования вероятностного коррелометра	169
А.2 Программа моделирования работы вероятностного арифметического устройства.....	170
А.3 Программа моделирования работы вероятностных преобразователей сигнал-вероятностное отображение и анализа их характеристик	171
А.4 Программная модель вероятностного устройства для определения статистических характеристик случайного сигнала	172
А.5 Модуль вероятностного преобразования и восстановления информации...	173

А.6	Полимодельный оптимизационный комплекс решения задач информационной логистики.....	174
А.7	Программный комплекс быстрого вероятностного преобразования и восстановления информации.....	175

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы 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 нулей и единиц, но массивами данных, сотнями миллионов Тбайт ежедневно. Находясь в условиях жесткой конкуренции в сфере производства товаров, предоставления услуг, их реализации и поддержки всех сопутствующих процессов, организации прибегают к использованию различного рода логистических информационных систем.

Сама информационная логистика испытывает активный рост, проникая в ранее не затронутые сферы деятельности. Сегодня эти механизмы задействованы в различных маркетплейсах, сетевых магазинах, службах экспресс-доставки и др. Стоит отметить смещение центра принятия решений от единой точки к периферии, или, другими словами, децентрализацию принятия решения, так как основной рабочей единицей логистических компаний становится многочисленный роевой парк привлекаемых активов, где каждый элемент может принимать решение об обслуживаемых заявках, порядке их выполнения, их количестве, маршруте доставки и др. При этом стоит учитывать, что компоненты такой системы находятся в разных местах города, региона или же страны, это обуславливает невозможность создания гомогенной системы. Необходимо отметить развитие беспилотной техники на вооружении у крупных компаний, которая требует немалого информационного ресурса для ориентации в городской среде. Учитывая все выше перечисленное, такие системы носят сетцентричный характер с большим потоком информации, которую можно разделить на основную информацию, обеспечивающую сам бизнес-процесс, и вспомогательную

информацию, используемую логистическим активом для сопровождения непосредственного процесса доставки.

Основные информационные потоки включают в себя:

- разного рода ресурсы, запланированное производство; готовые товары, используемые в работе;
- процессы, связанные с финансовыми операциями.

Вспомогательные информационные потоки включают в себя:

- услуги, производимые в пределах системы, чтобы удовлетворить пожелания внутренних и внешних потребителей;
- устные, электронные, бумажные сообщения для общения между всеми участниками системы.

Необходимо отметить, что на сегодня взаимодействие в виде общения между участниками системы играет важную роль, так как данная информация может содержать сведения, непосредственно влияющие на конечную стоимость товаров и услуг.

Интенсивное развитие информационной логистики, связанное с ростом количества документов, сервисов, услуг, возникновение дополнительных информационных потоков, вспомогательной информации и инклюзивного общения заказчика, продавца и логистического сервиса ведет к кратному увеличению потоков данных как по количеству самих потоков, так и по их объему, что требует развития новых механизмов управления потоками данных в условиях современной сетевой инфраструктуры.

Использование современной сетевой инфраструктуры обусловлено отсутствием возможности создания гомогенной среды и требует комплексного подхода к обеспечению бесперебойной работы и достижению необходимых показателей пропускной способности. Проблема связана с многообразием технических средств, маршрутных альтернатив и способов передачи информации, используемых при формировании и наращивании инфраструктуры. Управление и координация информационной системы представляет собой сложную задачу, требующую учёта множества изменяющихся и разнотипных параметров. По своей

природе большинство параметров имеет случайный и не всегда детерминированный характер, однако среди них есть и стационарные параметры, а также целые комплексы факторов внешнего воздействия, имеющих естественное или антропогенное происхождение.

Многообразие параметров, определяющих эффективность сетевых транспортных потоков, обуславливает необходимость разработки инновационных методов моделирования, принятия решений в условиях неопределённости и рисков, а также применения численных методов с использованием вероятностных оценок. Децентрализованные системы с сетевым управлением задействуют все доступные каналы связи, формируя сложную, разнородную структуру, работоспособность которой определяется требованиями к надёжности и пропускной способности.

Системы, работающие в режиме «роя», на базе сетецентрической модели вызывают ряд проблем, связанных с динамичностью самого «роя», – количеством компонент, его связями и их состоянием, многогранностью использования технологий. Взаимное влияние, использование метода синтеза и еще целый ряд других аспектов делают задачи моделирования, оптимизации построения структур и принятия решений сложными не только с точки зрения получения самих показателей, но и с точки зрения выбора методов их получения.

Применение таких систем в условиях значительного удаления от стабильных источников питания, в агрессивных средах, при экстремально низкой температуре и невозможности частого обслуживания требует применения специфических методов, основанных на повышенной надёжности, при этом на малых аппаратных размерах и соответственно низких энергозатратах. К одним из таких можно отнести вероятностное представление данных.

Решение задач реального времени в парадигме логистических информационных технологий, когда обстоятельства требуют не просто решения, а максимально быстрого, взвешенного и при этом максимально эффективного подхода в экстремальных условиях, нуждается в развитии новых методов прикладной математики и информатики.

Степень разработанности темы. Задачи многокритериальной оптимизации информационных систем, базирующихся на интеллектуальных методах, представлены в научных трудах Л.А. Гладкова, Н.В. Гладковой, С.Н. Лейбы [1]. Построение моделей интегрированной информационной системы транспортной логистики на основе мультиагентных технологий представлены в работах Ю.М. Искандерова [2]. Концептуальное моделирование систем интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационных сетей представлены в работах Н.П. Будко [3].

Применение вероятностного представления данных является частным случаем двоичного представления, которое несет в себе большую часть избыточности, что представляет научный интерес.

Само по себе вероятностное представление достаточно хорошо описано, что упрощает основу для дальнейшего исследования. В научных изданиях широко известны труды Сапожникова Н.Е., Моисеева Д.В. [4,5,6,7,8], посвященные первичным преобразователям напряжение - вероятность, фаза - вероятность, частота - вероятность. Предлагаемые преобразователи имеют математическое описание, а также авторами исследовано качество выполнения преобразования [9].

При рассмотрении вероятностного представления также стоит отметить наличие и проработанность элементной базы для выполнения базовых арифметических операций, таких как сложение [10], умножение [11], вычитание [12] и деление, а также специфичных операций по нахождению математического ожидания [13], дисперсии и корреляции.

Целью работы является повышение качества функционирования сетевых инфраструктур в системах информационной логистики путем применения многокритериальных оптимизационных моделей.

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

1. Анализ проблематики решения 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.

Методы исследований

Для достижения поставленных задач использовались: теория множеств с применением методов дискретной математики, вероятностного преобразования информации, стохастических вычислений, построения аналитических и имитационных моделей сложных систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели в дискретно-стохастической постановке для оптимизации многоиндексной структуры базовых функциональных коммуникационных задач информационной логистики.

2. Метод быстрого вероятностного преобразования и комплекс программ для исследования характеристик быстрого вероятностного восстановления информации.

3. Комплекс программ для решения коммуникационных задач информационной логистики в сетевых инфраструктурах СИЛ.

Научная новизна

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

Практическая ценность 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.

Апробация работы

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.

Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается использованием при разработке моделей известных математических методов и результатами вычислительных и натурных экспериментов.

Публикации

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

Структура и объем диссертации

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.

Первая глава посвящена основным понятиям информационной логистики, сферам ее применения и имеющимся проблемам. 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. 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 второй главе приводятся необходимые теоретические сведения, дается описание модельных идентификаторов. Приводятся критерии работы каналов информационного обмена систем информационной логистики. Определяется критериальный набор математических моделей для решения задач векторной оптимизации. Производится описание модельных идентификаторов, матрицы решений, модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач для поиска экстремумов стоимостных показателей информационного потока; временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия; надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика и показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений. Описываются стохастические модели нахождения экстремумов стоимостных показателей информационного трафика, временных затрат информационного обмена, обеспечения функций надежности сетевого трафика, показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

Третья глава посвящена методике помехоустойчивого кодирования информации, представленной в виде вероятностного отображения. В первом разделе содержатся теоретические сведения о вероятностном представлении информации и его особенностях. Во втором разделе затрагивается информация, касающаяся нативных помехоустойчивых свойств вероятностного отображения. В третьем разделе предлагается методика, позволяющая расширить ингерентные помехоустойчивые характеристики. В четвертом рассматривается методика,

позволяющая придать вероятностному представлению не только свойства помехоустойчивости, но и значительно повысить время восстановления передаваемого значения, рассматриваются положительные эффекты «быстрого» вероятностного преобразования в условиях отсутствия помех в информационном канале связи и при наличии воздействия помех на вероятностно представленную информацию. В пятом проводится вариантный анализ быстрого вероятностного восстановления для сравнительного анализа с существующими аналогами.

Четвертая глава посвящена комплексу программ оптимизации информационной логистики. Первый раздел описывает системы принятия решений ЛПР на основе полимодельного комплекса, осуществляющего вычисление с использованием оценочной матрицы. После чего полученные данные переносятся в двумерное пространство, принимая графический вид для упрощения принятия решения для ЛПР. Второй раздел посвящен комплексу программ оптимизации качества работы сетевых инфраструктур в системах информационной логистики, описывает использование разработанного комплекса программ для решения задач оптимизации информационной инфраструктуры СИЛ по заданным критериям. Также рассматривается конкретный пример решения задачи.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ РЕШЕНИЯ КОММУНИКАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКИ

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

Приводятся нормативно-правовые акты, на основании которых велось развитие последние 20 лет, содержащие концепцию развития на ближайшие 5 лет. Описываются успешные примеры систем информационной логистики, применяемые в работе государственных органов, физических и юридических лиц. Имеющийся опыт позволяет государственным органам власти качественно выполнять услуги, при этом предоставление цифровых услуг становится не только доступнее, но и охватывает все новые сферы повседневной жизнедеятельности. Одним из последних удачных внедрений стоит отметить маркировку продуктов питания системы «Честный знак», которая позволяет потребителю защититься от просроченной или контрафактной продукции, узнать состав продукции и информацию о производителе.

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. Выполнен выбор проблемной области в информационной логистике, опираясь на актуальные проблемы, накопленные за время работы уже существующих систем, которые выявили их слабые стороны. Имеющиеся проблемы намечают актуальные направления, такие как системы принятия решений на базе моделей оптимизации параметров систем информационной логистики.

Первый раздел посвящен развитию цифровизации в России, примерам реализованных систем информационной логистики, используемых в области государственного регулирования, и положению страны в мировом рейтинге цифровизации данной области.

Второй раздел дает анализ текущего положения в информационной логистике, определяются основные понятия и описываются компоненты, входящие в состав систем информационной логистики.

Третий раздел рассматривает актуальные затраты на внедрение систем информационной логистики, даются актуальные данные по затратам для малых и больших предприятий.

В четвертом разделе производится актуализация проблематики и выбор параметров дальнейшего исследования.

1.1. Текущая ситуация и анализ цифровизации в России

Развитие цифровых систем, их доступность позволяют применять информационные системы в новых сферах. Вместе с этим отмечается объем передаваемой, хранимой и обрабатываемой информации.

Всего двадцать лет назад системы обработки, хранения и передачи информации были широко представлены в банковских, транспортных, складских системах [14-17]. Основной задачей определялось формирование систем, в основе своей имеющих логистический подход, нацеленных на повышение качества обслуживания потребителей и общее повышение требований к информатизации бизнес-процессов.

Наряду с мировым приоритетом развития информационных систем, которые можно отнести СИЛ, наша страна также делает ставку на развитие информационных технологий, что отражается в ряде нормативно-правовых актов [18], среди которых следует отметить:

- Федеральный закон № 149 от 27 июля 2006 г. «Об информационных технологиях и о защите информации», последняя редакция которого была обновлена в соответствии с № 411-ФЗ от 23.11.2024;
- Федеральный закон № 98 от 29 июля 2006 г. «О коммерческой тайне», последняя редакция которого была обновлена в соответствии с № 251-ФЗ от 08.08.2024;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. №1315-р «О концепции технологического развития на период до 2030 г.»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1815-р от 20 октября 2010 г. Государственная программа Российской Федерации «Информационное общество»;
- Федеральная целевая программа «Электронная Россия (2002 - 2010 годы) на основании постановления Правительства Российской Федерации от 28 января 2002 г. № 65;
- Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.»;
- Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р.

Благодаря внедрению цифровых технологий на сегодня существует множество систем и цифровых сервисов, с помощью которых современное российское общество уже в 2022 году вошло в десятку лидеров стран в области цифровизации госуправления, согласно рейтингу GTMI было отнесено к группе А, тогда как, по данным на 2020 год данной классификации, относилась к группе В [19].

За время реализации государственных проектов, направленных на цифровизацию российского общества, были сформированы системы, которые можно условно разделить на следующие группы:

- Межведомственные системы;

- Системы сбора, обработки и хранения персональных данных граждан РФ;
- Системы проведения выборов, законотворчества и правосудия;
- Финансовые, налоговые системы, сервисы и услуги;
- Градостроительные и градоуправленческие информационные системы;
- Отраслевые.

К группе межведомственных систем относятся: Государственная автоматизированная информационная система ГАС «Управление» [20], Система межведомственного электронного взаимодействия, Единая цифровая платформа «Гостех», Единая информационная платформа Национальной системы управления данными (ФГИС «ЕИП НСУД») [21].

В системы сбора, обработки и хранения персональных данных граждан РФ входят такие системы, как: Единая биометрическая система, Электронный паспорт гражданина Российской Федерации, Цифровой паспорт болельщика (Fan ID), Портал государственных услуг Российской Федерации (ЕП «Госуслуги»), Единая система идентификации и аутентификации (ЕСИА), Федеральная типовая медицинская информационная система (ФТ МИС), Единая медицинская информационно-аналитическая система (ЕМИАС), ГИС «Похоронно-погребальная деятельность».

К системе проведения выборов, законотворчества и правосудия относятся: Государственная автоматизированная система «Выборы» (ГАС «Выборы»), Государственная автоматизированная система «Правосудие» (ГАС «Правосудие»), Автоматизированная система обеспечения законодательной деятельности (АСОЗД), Федеральная государственная информационная система досудебного обжалования (ФГИС ДО), Государственная автоматизированная система правовой статистики (ГАС ПС).

Финансовые, налоговые системы, сервисы и услуги, включающие в себя следующие системы: Личный кабинет налогоплательщика — интернет-сервис ФНС России, автоматизированная система контроля за возмещением НДС из бюджета (АСК НДС), государственная интегрированная информационная система

управления общественными финансами Российской Федерации (ГИИС «Электронный бюджет»), Единая информационная система в сфере закупок, Государственная информационная система о государственных и муниципальных платежах (ГИС ГМП), Автоматизированная информационная система лицензирования отдельных видов деятельности (АИС ЛОД).

Градостроительные и градоуправленческие информационные системы включают: Информационные системы обеспечения градостроительной деятельности (ИС ОГД), Федеральная государственная информационная система территориального планирования (ФГИС ТП) и Государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства (ГИС «ЖКХ»).

Отраслевые системы - это: Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз), Государственная автоматизированная информационная система «ЭРА-ГЛОНАСС» (ГАИС «ЭРА-ГЛОНАСС»), Автоматизированная информационная система «Безопасность дорожного движения» (АИС «Безопасность дорожного движения»), Система маркировки и прослеживаемости товаров (Россия), Федеральная государственная информационная система «Меркурий» (ФГИС «Меркурий»), Федеральная государственная информационная система «Зерно» (ФГИС «Зерно»), Единая государственная автоматизированная информационная система учета объема производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции (ЕГАИС «Алкоголь»), ЕГАИС-Маркировка (выведена из эксплуатации), Единая государственная автоматизированная информационная система учёта древесины и сделок с ней (ЕГАИС «Лес»), автоматизированная система, предназначенная для государственного контроля над изготовлением обуви и торговым оборотом в обувной промышленности. (ЕГАИС «Обувь»), Единый реестр российских программ для ЭВМ и БД.

Сложившаяся динамика показывает тренды к укрупнению и объединению, основой слияния являются системы межведомственного электронного взаимодействия, однако наряду с этим предоставляемые сервисы становятся доступнее, а скорость получения услуги в разы быстрее.

Отдельно необходимо отметить развитие Северного морского пути на период до 2035 г., которое включает информационное сопровождение проекта и требует учета его специфики, связанной с необходимостью работы в труднодоступных областях, в условиях полярной ночи. Такие условия эксплуатации накладывают на применяемые решения такие ограничения, как надёжность, малое энергопотребление [22,23], помехозащищённость, всесторонняя защищённость от воздействия внешних негативных факторов и др.

С развитием технологий машинного обучения и внедрением автоматических беспилотных систем увеличивается сфера применения и ужесточаются требования к информационным системам, начиная от бесконтактной идентификации людей и транспортных средств, имеются внедрения в медицину и, в частности, телемедицину, системы безопасного города и другие.

1.2. Обзор проблем решения коммуникационных задач информационной логистики

Если ранее системы информационной логистики были основой для логистических центров, транспортных компаний, то на сегодня нужно отметить, что к данным системам стоит относить все сопряженное с внедрением систем электронного документооборота (ЭДО), цифровизацией областей коммерческой автоматизации и логистики, других систем, связанных с интенсивным информационным потоком документов, сопряженным с цифровой идентификацией участника, и интенсивное использование им цифровых данных и сервисов, высокие требования к критериям надежности, быстродействия, ответственного хранения, безопасной и надежной передачи данных, имеющих в своем составе децентрализацию и неоднородность.

Современным методам и подходам к решению задач информационной логистики посвящены работы следующих авторов: Поросенкова, В.В. [24], Антоненкова А.В. [25,26], Бимкулиной А.Л. [27], Глушко В.А. [28], Турлаевой Р.С. [28], Шепелина Г.И. [30-34], Кузменко Ю.Г. [35], Мерзляка А.В. [36], Гришина Д.С.

[37], Дмитрука К.А. [38], Родкиной Т.А. [39], Некрасовой Е.С. [40], Башкировой Ю.А. [41], Медведевой В.А. [42], Хэссига К. [43], Ежова Ю.С. [44], Волкова, Г.А.[45], Егорова Л.Э. [46], Синютича, К.В. [47], Калитина, Д.В. [48], Моисеева, Д.В. [49- 51] и др.

Проведенный анализ работ показывает, что задачи информационной логистики носят двойственность в рассмотрении вопроса. Один из подходов базируется на рассмотрении понятия информационной логистики как раздела науки о логистике, базирующейся на ERP-системах (англ. enterprise resource planning, планирование ресурсов предприятия) [52-55], другой - как части информационного менеджмента [56]. Актуальным направлением выделим исследование сетевых инфраструктур в логистических информационных системах.

Наиболее точным и полным представляется определение информационной логистики как науки о реализации методов сбора, обработки, хранения и распределения информации в производственно-хозяйственных системах и их окружении на основе логистических правил (повышение релевантности информации в нужном объеме, в нужное время, в нужном месте и с оптимальными издержками). Данное определение встречается у Родкиной Т.А. [39] и в некоторых других современных источниках [57].

Определим, какой набор компонентов и их порядок взаимосвязи будем понимать под системой информационной логистики (СИЛ). СИЛ представляет собой совокупность элементов, генерирующих, передающих, обрабатывающих, хранящих и управляющих информационными потоками, обеспечивающих необходимый уровень скорости, надежности, достоверности и автономности, объединенных в единую информационную сеть.

Генерирующие элементы СИЛ представляют собой информационный ресурс в виде любой значимой в рамках системы информации: складских, транспортных, сырьевых данных, данных о состоянии объекта мониторинга, об изменении цифровой модели и др.

Передающие элементы – это сетевая инфраструктура, использующая все возможные средства передачи информации, включающая каналы связи, среды распространения, аппаратуру передачи, усиления и иные.

Обрабатывающие компоненты СИЛ подразумевают высокопроизводительные вычислительные комплексы, в том числе центры обработки данных. Территориальное расположение центров обработки играет ключевую роль в надежности, быстродействии и эффективности работы СИЛ, поэтому обработка может выполняться централизованно либо может представлять территориально распределенную систему.

Элементы хранения играют роль хранения информации, поступающей от элементов системы. Информация для хранения может быть первичной, обработанной или подготовленной к обработке. Чаще всего в качестве элемента хранения используются базы данных, но также не исключаются и сетевые файловые системы для работы разнородных операционных систем (ОС)[58].

Элементы управления осуществляют диспетчеризацию всех информационных процессов, управление ресурсами, прогностическими расчетами и выработку стратегий функционирования и развития формаций СИЛ. В большинстве случаев для сложных систем необходимо осуществлять принятие решения в условиях, когда критерии по оптимальному решению противоречивы, требуют учитывать большое количество факторов, в том числе, когда критерии на текущей стадии функционирования системы не имеют фактических значений, но должны быть учтены.

СИЛ характеризуется множеством источников и потребителей информации, которые генерируют и потребляют большие информационные потоки, генерируют потоки задач, требующие сложной диспетчеризации. Другой характеристикой является неоднородность циркулирующей информации, гетерогенность транспортной информационной инфраструктуры и сложность коммуникационных маршрутов. Многообразие разноприоритетных критериев и ключевых параметров порождает вариативность оптимизации СИЛ.

В системах, которые подразумевают управление и наблюдение за критическими объектами, такими как беспилотный транспорт [59], необходимо создавать такие СИЛ, которые позволяют в сложных, насыщенных и разнородных условиях осуществлять наблюдение за объектами автоматизации, мгновенно получая информацию о нештатных и критических ситуациях, требующих отдельного внимания, в том числе участия оператора. При этом данные каналы должны быть надежны, безопасны, стабильны и достоверны. Решение нештатных ситуаций должно выполняться в кратчайшие сроки, для чего необходимо обеспечение функционирования в различных условиях.

Важную роль в СИЛ играет сетевая инфраструктура [60-65], которая осуществляет транспортную роль, важным или критическим элементам системы необходимо наличие резервных систем связи, реализующих концепцию, обеспечивающих нужный уровень помехоустойчивости, отказоустойчивости, надежности, быстродействия. При этом необходимо учитывать стоимостные характеристики. Отмечается, что использование сетей нового поколения требует отдельного решения вопросов помехоустойчивости и надежности.

Географически широко распределенные СИЛ используют принципы распределенной обработки и хранения данных, что подразумевает наличие и использование региональных центров обработки данных (ЦОД), которые, в свою очередь, осуществляют актуализацию информации, методов и моделей обработки на всех узлах репликации. Сбой 19 июля 2024 г. в системах внутренних рабочих нагрузок Azure вызвал крупный коллапс в работе хранения и вычисления, это привело к длительной остановке в работе авиакомпаний и аэропортов, банковских систем, медучреждений, железнодорожных операторов, телеканалов, что вызвало убытки и репутационные потери организаций. На восстановление работоспособности некоторых элементов потребовалось около 2 суток.

Для организации кросс-платформенного взаимодействия, а также для согласования разнородных несогласованных систем с множественным набором данных на сегодня очень широко используется XSD-схемы. Данные механизмы используются государственными ведомствами для организации

межведомственного взаимодействия, например, передачи данных о физических или юридических лицах при взаимодействии Федеральной налоговой службы и ее ведомства - Федеральной службы по контролю за алкогольным и табачным рынком.

Отмечается, что государственные органы в части подачи документов от граждан и организаций осуществляют переход от единых систем, таких как ПС участника ЕГАИС, на универсальные платформы – УТМ ЕГАИС (начиная с 01.06.2016 осуществляется поэтапный переход). Это способствует использованию множества систем учета от разных производителей, для разных платформ, положительно сказывается на развитии цифровизации в целом, стимулирует появление новых разработчиков программного обеспечения (ПО).

1.3. Стоимость внедрения СИЛ

Внедрение систем связано с жесткими, постоянно меняющимися условиями функционирования СИЛ. Современные требования связаны не только с объемом обрабатываемой информации, но в большинстве своем с вовлечением большого числа пользователей.

Классические расчеты, выполненные на базовых моделях централизованной системы, где существует возможность объединения пользователей системы общей высокопроизводительной, надежной, помехоустойчивой инфраструктурой предприятия, доступны [66], однако имеют значительный разброс, связанный с размером предприятия, количеством пользователей, степенью интеграции и индивидуальными решениями. Стоимость решений может варьироваться примерно от 6000 тысяч рублей на пользователя для больших решений, общая стоимость которых может превышать 60 миллионов рублей, до 20 тысяч рублей для малых предприятий численностью до 5 человек. Отмечается, что данная сумма может быть выше в связи с необходимостью проработки индивидуальных потребностей организации.

В стоимость решения под ключ, входит и стоимость лицензии на пользователя. Базовые решения для внедрения рабочего места варьируются от 20 до 300 тысяч рублей.

Широкое применение, в том числе в режиме удаленного подключения, наряду с увеличением выручки организации, комплексно повышает стоимость внедрения системы. Например, для организаций - грузоперевозчиков алкогольной продукции необходима установка систем связи для постоянного мониторинга нахождения транспортного средства, а также мониторинга состояния перевозимого груза, однако в подавляющем большинстве организации не заботятся о повышении надежности систем в плане использования резервных каналов связи. Дополнительные затраты на организацию резервных стационарных каналов связи составляют от 10 тысяч рублей разово (в зависимости от сложности реализации ее стоимость может превышать 1 миллион рублей) и от 600 рублей ежемесячно, в то время как организация резервного мобильного канала связи на базе 3G, 4G, LTE составит от 1 до 50 тысяч рублей разово в зависимости от качества сигнала и необходимой скорости и от 400 рублей ежемесячно.

Учитывая вышесказанное, современная опорная инфраструктура СИЛ должна осуществляться на основе высокопроизводительных, отказоустойчивых решений стационарных каналов связи с резервированием, а элементы в виде пользовательских решений и подвижные компоненты - обеспечиваться резервными мобильными каналами связи. Стоимость конечных решений будет существенно разниться в зависимости от территориального распределения элементов СИЛ, его компонентов, дополнительное оснащение резервным каналом связи в целом немного меньше стоимости решений для элемента системы. В ситуациях с полным отсутствием резервных каналов связи простой технологического оборудования или транспортных средств многократно превышает вложенные средства в резервирование, что характеризует данный подход как актуальный и необходимый к реализации.

1.4. Выбор проблемной области для решения актуальных коммуникационных задач информационной логистики

Рассмотрение проблемы показывает, что в основе любой системы информационной логистики действуют следующие принципы [67]:

- полнота и точность;
- своевременность;
- ориентированность;
- гибкость;
- подходящий формат.

Эти принципы имеют высокий уровень рассмотрения и глубокую проработку, разработаны методики и предложены разнообразные подходы, которые в настоящий момент отражены в программных реализациях таких прикладных программных систем, как 1С.

Однако данные принципы не затрагивают аспекты, связанные с исследованием сетевых инфраструктур в логистических информационных системах, и повышение качества их функционирования. Как видно из рисунка 1.1, структура СИЛ разнообразна и неоднородна, включает в себя информационное пространство, сетевую инфраструктуру передачи данных и физическое пространство, влияющее на формирование первых двух составляющих. Под качеством информационной логистики будем понимать оптимизацию многоиндексной структурой базовых функциональных коммуникационных задач информационной логистики:

- минимизация стоимостных показателей информационного трафика (С-модель);
- минимизация временных затрат для информационного обмена (Т-модель);
- максимизация функций надежности сетевого трафика (Р-модель);

– максимизация показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений (К-модель).

–

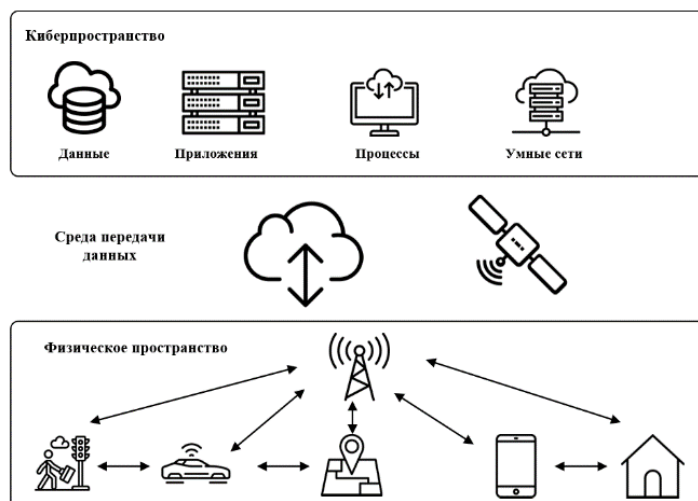


Рисунок 1.1 – Концептуальная схема системы информационной логистики

Для класса задач СИЛ ключевым аспектом являются стоимость конечного решения для системы, время, так как СИЛ работают по правилу «точно и в срок», надежность – влияет на работоспособность системы в целом, помехоустойчивость – так же как критерий работоспособности в режиме беспилотных систем как части СИЛ. Эти параметры напрямую влияют на качество работы СИЛ [49 – 51]:

- скорость циркуляции информационных единиц в системе, что напрямую влияет на быстродействие системы в целом от источника к потребителю, выраженное во времени доставки сообщения;
- стоимость передачи информации, показатель, который отражает стоимостные характеристики при выборе разных путей коммутации;
- помехоустойчивость, крайне важный параметр при использовании подвижных средств связи и в условиях отдаленного расположения компонентов СИЛ, не имеющих стабильных каналов связи;
- надежность компонента СИЛ является одним из основных параметров функционирования, так как отсутствие возможности передать информацию в текущих условиях применения приведет к простоя системы и существенным убыткам.

Отдельно выделяется необходимость проработки помехоустойчивости и надежности, так как современные сети базируются на сетях 5G, которые позволяют использовать высокие скоростные характеристики при информационном обмене и низкую задержку информационных пакетов.

Необходимо также учитывать перспективные программы развития отдаленных и труднодоступных мест нашей страны, такие как Северный морской путь. Данные проекты дополнительно накладывают ряд ограничений на использование сетевых инфраструктур в СИЛ, связанных со спецификой условий реализации проектов – низкие температуры, труднодоступная местность, отсутствие стабильных источников энергии и др. Такие проекты требуют применения специфических решений, таких как системы, основанные на вероятностном представлении данных, основанных на энергоэффективности, надежности, устойчивости к агрессивным условиям функционирования.

Важность указанных принципов подтверждена имеющимся опытом работы сложных СИЛ, в частности, таких как ЕГАИС «Алкоголь», «Маркировка», «Лес», «Обувь» и др. Данные системы широко внедрены в бизнес-процессы предприятий и являются неотъемлемой их частью, вместе с тем позволяют осуществлять контроль в этих сферах государственному регулятору, однако стоит учитывать и возможные области, куда данные системы только планируются к внедрению.

Применение ранее описанных систем подтвердило их эффективность в борьбе с недобросовестными производителями и контрафактной продукцией. Практика применения вышеупомянутых СИЛ, имеющая опыт использования более 10 лет, говорит о недостаточной проработке вопроса повышения качества работы сетевых инфраструктур в логистических информационных системах. По мере увеличения количества пользователей системы резко растут проблемы, связанные приемом и передачей информации. Особенно данная проблема актуальна для удаленных от крупных населенных пунктов предприятий, где крайне ограничено количество имеющихся каналов связи и чрезвычайно низко качество связи, это не позволяет вовремя осуществлять подачу информацию регулятору, что, в свою очередь, ведет к убыткам.

Организации вынуждены часами, а иногда по несколько суток дожидаться фиксации электронного документооборота из-за отсутствия альтернативных стабильных каналов связи. Часто имеющиеся резервные каналы не способны в сжатые сроки доставить требуемую для легального оборота продукции электронную отчетность. Это вызвано низкой помехоустойчивостью используемых каналов связи, в результате чего «тяжелые» документы отправляются длительное время, что вызывает простои в отгрузках и отпуске транспортных средств с территории организации.

1.5. Выводы по главе

Развитие цифровизации в России осуществляется поэтапно, начиная с 2006 г. На разных этапах становления удачные примеры внедрения обретают новые формации, расширяя опыт на смежные отрасли, улучшая имеющиеся системы.

Концепция технологического развития на период до 2030 г., принятая государством, подчеркивает необходимость развития цифровизации и информационных систем, делая их основой развития экономики, науки, медицины и других областей. Решения в области систем информационной логистики на стыке с нехарактерными отраслями, такими как медицина, автоматизированные комплексы и др., показывают синергетический эффект от применения СИЛ с системами машинного обучения, развивая, в том числе, телемедицину, помогая точнее и быстрее ставить диагноз.

Внедрение цифровых систем и сервисов позволяет держать лидерские позиции по показателям их применения на мировом уровне, однако зарубежные аналитические компании исключают Россию из рейтингов либо искусственно занижают ее показатели. Имеющиеся тенденции до 2023 г. показывают стабильный рост, несмотря на большое количество санкций, запрет на доступ к ряду зарубежных технологий и нарушение технологических цепочек. Данная ситуация дополнительно стимулировала развитие внутренних решений, которые ввиду

локализации показывают более высокую, по сравнению с имеющимися аналогами, экономическую выгоду на всех уровнях внедрения.

Анализ стоимости решений дает понимание о необходимости повышения качества используемой информационной транспортной инфраструктуры, что может быть сопоставимо со стоимостью внедрения системы. Однако влияние рисков и ситуаций, ведущих к простоем технологического оборудования, транспорта, в особенности если данная система функционирует в критических областях, таких как медицина, отсутствие развитых резервируемых систем коммуникации приводит к убыткам, репутационным потерям или стоит утерянного здоровья. Экономические, репутационные потери или использование СИЛ в критических областях оправдывают повышение степени надежности, скорости и помехоустойчивости таких систем в целом.

Обзор имеющихся наработок в области СИЛ показал высокий уровень имеющихся решений в области построения таких систем с точки зрения подхода к ним экономической науки, но необходимо понимать, что такой подход ориентирован только на содержательную часть и рассматривает лишь такие характеристики, как полнота и точность, своевременность, ориентированность, гибкость, подходящий формат. Вместе с этим вопросы качества работы сетевых инфраструктур в СИЛ остаются неизученными.

Расширение областей применения и накопленный опыт работы СИЛ, развитие собственных решений в области СИЛ показывает ряд проблемных мест, связанных с необходимостью повышения качества работы сетевых инфраструктур в СИЛ. Необходимо также учитывать и развитие отдаленных территорий нашей страны, накладывающее специфические требования к компонентам таких систем. Данные системы в имеющихся реалиях и областях применения требуют высокого уровня быстродействия, экономичности решений, надежности и, что особенно характерно для существенно децентрализованных систем ввиду отсутствия стабильных каналов связи, помехоустойчивости. Сами системы имеют сложную гетерогенную структуру с множеством разнородных компонентов, это делает

актуальными работы, направленные на повышение качества функционирования сетевых инфраструктур в СИЛ.

ГЛАВА 2. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ, ОПИСАНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ В ДИСКРЕТНОЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Глава посвящена вопросам формирования математической модели оптимизации СИЛ, в ее рамках выполнен обзор актуальности данной работы, связанной с необходимостью для лица, принимающего решение, выполнять анализ множества характеристик и на их основе осуществлять принятие решения.

Как отмечалось ранее, существующие СИЛ имеют большую инфраструктуру, работа которой требует обеспечения заданного качества, уровня отказоустойчивости, надежности и помехозащищенности, при решении критических задач, что может быть связано с издержками и простоями. Кроме непосредственной сложности при решении задач оптимизации информационной логистики стоит отметить необходимость генерировать актуальное, выверенное и быстрое решение.

На базе проведенного анализа параметров СИЛ наиболее актуальными являются следующие параметры: стоимость передачи информации по каналам связи, время доставки сообщений в СИЛ, показатели надежности и помехоустойчивости.

Для решения вопросов оптимизации выбранных критериев и построения моделей необходимо выполнить формализацию модельных идентификаторов, матрицу модельных решений и формализовать модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач для поиска экстремумов стоимостных показателей информационного трафика, временных потерь информационного обмена, надежности функций и показателей помехоустойчивости.

В связи с тем применение моделей может быть связано с отсутствием части данных по работе системы, но при этом они могут оказывать существенное влияние на принятие решения, для чего может быть использован стохастический подход к описанию модели.

Использование стохастических моделей подразумевает описание случайных величин или событий [68], описание стохастичности исследуемых зависимостей выражается терминами теории вероятности. Стохастические модели можно разделить на дискретные и непрерывные, как и для случая непрерывных систем [69].

Непрерывно-стохастические модели [70]. Такие модели характерны для описания систем с непрерывными зависимостями наличия неопределенности в поведении от времени. К наиболее частому применению таких моделей можно отнести системы массового обслуживания. Они характеризуются стохастичностью функционирования, вероятностным характером моментов окончания обслуживания, присутствием потока заявок на входе и выходе системы, действием механизмов обработки, последовательностью событий и формированием очередей, применением определенного принципа их обработки и др.

Опираясь на описание данных моделей, непрерывно-стохастические модели в решении задач оптимизации каналов связи СИЛ не применимы.

Для исследования таких случайных процессов, как передача данных по каналам связи, применяется подход, основанный на дискретно-стохастических моделях. Такие модели характерны для дискретных систем, подчиняющихся статистически закономерному вероятностному поведению, их применяют при обучении вероятностных автоматов, изучении динамики систем на основе дискретно-детерминированного подхода, обрабатывающих входящие случайные сигналы и другие. Такие модели могут быть формализованы при использовании конечно-разностных уравнений с функциями стохастических величин или с помощью вероятностных автоматов.

Примером перехода детерминированных моделей в стохастические может быть использование математического ожидания (МО) случайной величины (M – постановка).

Для чего необходимо выполнить описание следующего набора задач в стохастической постановке: стохастическая модель нахождения экстремума стоимости передачи, временных затрат на поиск оптимального маршрута,

надежности и выбора параметров используемых методов помехоустойчивости, для первых двух моделей при нахождении экстремума необходимо выполнять поиск минимума, для остальных – максимума.

В разделе 2.1 дается обзор проблематики и выбор критериев для комплекса математических моделей для решения задач векторной оптимизации.

В разделе 2.2 производится описание используемых идентификаторов.

В разделе 2.3 приводится матрица решений.

В разделе 2.4 модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач для нахождения экстремума стоимостных показателей информационного трафика, временных потерь, связанных с обеспечением информационного обмена, надёжностных функций обеспечения сетевого трафика, помехоустойчивости передаваемых сообщений, для первых двух моделей при нахождении экстремума необходимо выполнять поиск минимума, для остальных – максимума.

В разделе 2.5 математическим моделям оптимизации СИЛ в стохастической постановке: модели поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока, временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия, поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика и показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

В разделе 2.6 выводы по главе.

2.1. Полимодельный комплекс функциональных задач оптимизации информационной логистики

Повсеместное использование СИЛ с применением интеллектуальных технологий в сфере государственного регулирования, медицины, управления беспилотным транспортом вызывает потребность в развитии новых, специфических методов. Среди них необходимо отметить важную роль таких научных областей, как: прикладные математические и информационные технологии, включающие теорию оптимизации расписаний, основы разработки

цифровых сетей, алгоритмы математического программирования, оценку нечетких моделей и методы моделирования в условиях неопределенности.

Активное применение СИЛ обуславливает необходимость совершенствования скорости и качества процесса принятия решений, разработки механизмов уменьшения нагрузки, вызванных выполнением рутинных задач операторами – лицами, принимающими решения, снижения нагрузки на каналы связи, соблюдения требований обязательной фиксации документооборота, минимизации рисков простоя основного технологического оборудования, системного и комплексного подхода к решению всевозможных вопросов функционирования СИЛ.

Основой любой СИЛ являются каналы связи, для которых характерны следующие показатели:

- реактивность доступа к компонентам источника, канала и приемника информации;
- своевременная, без задержек доставка сообщений;
- проактивное реагирование на технические неисправности, аварийное состояние и нештатный режим эксплуатации, структурная избыточность, поддерживаемая на заданном уровне обеспечения работоспособности;
- стабильность функционирования при наличии агрессивных внешних воздействий;
- заданный уровень помехоустойчивости.

Данные каналы информационного обмена являются специально регулируемые сервисами в сферах ответственного, критического и оперативного обмена информацией, обеспечивая рабочую среду и функционирование СИЛ в условиях распределенной инфраструктуры сетцентрической модели, работающие в режиме «роя», высокой агрессивности внешних воздействий и большого числа решаемых задач [71]. Такие структуры каналов играют важную роль при формировании задач СИЛ и вспомогательных компонентов. В зависимости от текущих задач и режима функционирования структуры могут играть роль как принимающей, так и руководящей структуры при разработке и внедрении важных

решений, охватывая весь спектр, от принятия до практического применения. Указанные свойства формируют запрос на создание передового научного направления: СИЛ, базирующейся на актуальных методах и программных решениях в особой предметной области. Сложность и изменчивость структурной организации каналов связи, их способность к трансформации, широкий спектр рабочих режимов и параметров в сочетании с неоднородностью настроек компонентов определяют комплексные задачи моделирования, оптимизации системы и принятия решений, включая вопросы выбора математического аппарата.

Как было отмечено ранее в главе 1, для опорных компонентов СИЛ – каналов информационного обмена, играющих ключевую роль в качестве работы всей системы, являются не описанными и не раскрытыми 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 пределах предлагаемых решений оптимизации видится реальной разработка механизма выработки проектных управляющих решений, реконфигурирования, экспансии и эксплуатации сетей каналов связи как компонентов СИЛ. Ввиду сложности решения и необходимости отдельного детального рассмотрения вынесены за скобки вопросы, посвящённые SWOT-анализу (SWOT: Strengths – сильные стороны, Weakness – слабые стороны, Opportunities - возможности, Threats - угрозы) [72] предложенных моделей.

Задачи СИЛ можно описать при помощи двудольных графов или биграфов, которые будут являться общей формальной моделью.

Пусть $G = \langle A, B \rangle$ двудольный граф у которого X и Y – доли графа, для которых справедливо следующее: $X, Y \neq \emptyset$; $X \cup Y = V$; $X \cap Y = \emptyset$, всякое ребро графа G соединяет вершину из множества X с вершиной из множества Y . В задачах оптимизации существенную роль играет паросочетание – особый подграф графа G , включающий набор несмежных рёбер, каждое из которых соединяет пару вершин. Для каждого набора независимых рёберных множеств в графе создаётся

соответствующая двоичная матрица, состав которой вычисляется в процессе оптимизации. Поиск максимального паросочетания решается простым жадным алгоритмом, поиск совершенного паросочетания также известен как алгоритм Фринка.

Ребро двудольного графа для паросочетания – элемент сетевого трафика. Функционально процесс передачи информации по системе передачи информации содержит следующие этапы:

1. преобразование информации;
2. сжатие информации;
3. помехоустойчивое кодирование информации выбранным методом с заданным уровнем обнаружения и исправления ошибки;
4. передача по каналу связи с помехами;
5. восстановление информации;
6. декодирование информации;
7. информация в первичном виде.

Упростим для удобства рассмотрения эти этапы до трех: кодирование на стороне источника информации, передача по каналу связи с помехами и декодирование на стороне приемника. Рассмотренный процесс можно легко представить в виде элемента двудольного графа ребра и одного паросочетания.

Существует ряд известных моделей для каналов информационного обмена:

- Модели и алгоритмы обеспечения помехоустойчивости для информационных каналов с максимизацией вероятности правильного приема [73-76].
- Базовые сетевые протоколы: TCP IPv4/v6, MPLS – многопротокольная коммутация по меткам, ICMP – протокол межсетевых управляющих сообщений, ARP – протокол определения адреса, DHCP – протокол динамической настройки узла.
- Протоколы маршрутизации: OSPF – протокол динамической маршрутизации с поиском кратчайшего пути, IS-IS – протокол маршрутизации промежуточных систем, RIP – протокол маршрутной информации, BGP – протокол

граничного шлюза, VRRP – сетевой протокол, предназначенный для увеличения доступности маршрутизаторов, выполняющих роль шлюза по умолчанию.

– Протоколы управления: Telnet, SSH.

Диапазон используемых сетевых технологий и протоколов можно расширить, что позволит значительно увеличить эффективность работы за счёт существующих технических решений. Это обуславливает необходимость разработки комплексного подхода к оптимизации потоков сообщений в каналах связи, включающего модели и методы, основанные на анализе множества скалярных критериев в рамках заданного критериального пространства. Базовый набор полимодельного оптимизационного комплекса функциональных задач СИЛ включает следующие модели:

1. Первая группа, включающая в себя две модели, для которых в качестве задачи нахождения экстремума стоит поиск минимума: модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока и модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия.

2. Вторая группа, включающая в себя также две модели, для которых в качестве задачи нахождения экстремума стоит поиск максимума: модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика и модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

Противоречивость набора моделей кроется в обеспечении баланса помехоустойчивости, стоимости, скорости и надежности. Решение вопросов улучшения таких параметров, как надежность, помехоустойчивость и скорость, прямо повышают стоимость. В свою очередь, данные параметры также имеют попарные конфликты, например, помехоустойчивость и скорость передачи [49 – 51].

2.2. Информационное описание используемых идентификаторов

Определим сквозные идентификаторы, 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 – $p_{rstu}(t)$:

$$p_{rstu}(t) = p i_{rshu}(t) \cdot p g_{rshu}(t) \cdot p c_{rshu}(t), \quad (2.1)$$

где вероятность безотказной работы:

- для источника – $p i_{rshu}(t)$;
- для приемника – $p g_{rshu}(t)$;
- для канала связи – $p c_{rshu}(t)$.

2.3. Матрица решений

Матрица модельных решений является важным инструментом управления, который позволяет систематизировать и оптимизировать процесс принятия решений. Особенно важна матрица в условиях, когда необходимо быстро реагировать на изменения и принимать взвешенные решения на основе анализа существующих проблем и возможных последствий. Она становится своеобразным навигатором в мире управленческих решений, помогая выбрать оптимальный путь эволюции системы.

Специфика начальных параметров и особенности конкретной проблемы могут придать свойства вырожденности матрице решений X .

Возможные варианты матрицы решений X : пустое множество или отсутствие решений $X \subset A_0$, наличие эффективного набора решений ($X \subset A_{opt}$) или некоторого одного оптимального $X \subset A_{opt}$. Структура матрицы определяется через вложенность множеств: базовое множество X входит в A_d и одновременно содержит в себе все мгновенные допустимые решения из A_m .

Комплексная структура матрицы X описывается четырехмерным параллелепипедом с размерами R, S, H, U , содержащим исключительно точки с целочисленными координатами. Анализируя суть задачи, заметим, что все элементы матрицы X должны удовлетворять системе равенств [49 – 51]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall u \in U: \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} x_{rshu} = 1 \\ \forall h \in H: \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \\ \forall s \in S: \sum_{r \in R} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \\ \forall r \in R: \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \end{array} \right. . \quad (2.2)$$

Проанализируем последнее уравнение системы (2.2): при работе с любым источником информации следует определить уникальное сочетание получателя, канала и метода кодирования.

Согласно (2.2), при передаче информации каждая пара источник-приемник работает с персональным каналом s из множества допустимых каналов S и уникальным кодом u из набора кодов U . Структура четырехмерной матрицы решений X формируется из компонентов x_{rshu} , принадлежащих множеству B двоичных чисел, характеризует его уникальность в рамках всего пространства.

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 ниже введем такое обозначение:

$$\left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in S} \left| \sum_{h \in H} \left| \sum_{u \in U} x_{rshu} \right. \right. \right. \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1. \quad (2.3)$$

В результате исследования базового случая с пуассоновскими потоками отказов (что является классическим подходом в анализе надежности технических устройств) мы приходим 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 [77], учитывая это:

$$\forall u \in U: \lambda_{rhsu} = \lambda i_{rhsu} + \lambda g_{rhsu} + \lambda c_{rhsu}. \quad (2.4)$$

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

$$P_{rshu} = \exp(-\lambda_{rshu} \cdot t_{rshu}) = 1 - \lambda_{rshu} \cdot t_{rshu}. \quad (2.5)$$

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

$$\begin{aligned} C &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cg_{rshu} + cc_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где стоимость для элементов в функциональной последовательности:

ci_{rshu} – передатчика;

cg_{rshu} – приемника;

cc_{rshu} – канала связи.

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

$$\begin{aligned} T &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} = \\ &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tg_{rshu} + tc_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Общая вероятность безотказной работы системы примет вид:

$$P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] . \quad (2.8)$$

Необходимо отметить, что помехоустойчивость системы является сложным комплексом решаемых задач, зависящих от множества факторов [52,65], общую помехоустойчивость K_{rshu} в функциональной последовательности будем рассматривать как совокупность, зависящую от помехоустойчивости источника – KI_{rshu} , помехоустойчивости приемника – KG_{rshu} и помехоустойчивости канала связи – KC_{rshu} , учитывая это, получим:

$$K_{rshu} = KI_{rshu} \cdot KG_{rshu} \cdot KC_{rshu}. \quad (2.9)$$

В процессе решения задач оптимизации становится очевидным, что данная запись сложна при выполнении вычислительных операций, по данной причине для упрощения вычислений операции умножения перейдем к ее логарифмическому показателю:

$$\begin{aligned} KL_{rshu} &= \ln K_{rshu} = \ln (KI_{rshu} \cdot KG_{rshu} \cdot KC_{rshu}) = \\ &= \ln KI_{rshu} + \ln KG_{rshu} + \ln KC_{rshu} = KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} . \quad (2.11)$$

2.4. Модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач

В соответствии с установленными критериями следует провести формализацию модели дискретной оптимизации, характеризующейся многоиндексной структурой базовых функциональных компонентов, а именно:

1. Первая группа, включающая в себя две модели, для которых в качестве задачи нахождения экстремума стоит поиск минимума: модель поиска экстремума

стоимостных показателей информационного потока и модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия;

2. Вторая группа, включающая в себя также две модели, для которых в качестве задачи нахождения экстремума стоит поиск максимума: модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика и модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

2.4.1 Модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока

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

$$C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} c_{rshu} \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} =$$

$$= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (c i_{rshu} + c g_{rshu} + c c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min , \quad (2.12)$$

учитывая ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (t i_{rshu} + t g_{rshu} + t c_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} < T_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0 \\ K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (K I L_{rshu} + K G L_{rshu} + K C L_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\ \left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in S} \left| \sum_{h \in H} \left| \sum_{u \in U} x_{rshu} \right| \right| \right| \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1 \end{array} \right. \quad (2.13)$$

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

2.4.2 Модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия

При рассмотрении вопроса необходимо учитывать, что полное устранение временных потерь невозможно, но можно стремиться к их минимизации до приемлемого уровня, достаточного для решения поставленных задач.

Учитывая отмеченное выше, в рамках поставленной задачи требуется найти такой набор элементов матрицы X , который обеспечит минимальные временные затраты на обеспечение информационного взаимодействия T , соблюдая при этом ограничения по: стоимостным показателям информационного потока, показателям надёжности системы и уровню помехоустойчивости, а также удовлетворяя условию:

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} =$$

$$= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (t_{i_{rshu}} + t_{g_{rshu}} + t_{c_{rshu}}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min, \quad (2.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} c_{rshu} \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (c_{i_{rshu}} + c_{g_{rshu}} + c_{c_{rshu}}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0, \\ K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\ \left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in S} \left| \sum_{h \in H} \left| \sum_{u \in U} x_{rshu} \right. \right. \right. \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1 \end{array} \right. \quad (2.15)$$

2.4.3 Модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика

В рамках данной модели требуется найти такой набор элементов матрицы X , который обеспечит максимальную вероятность безотказной работы при решении задач обеспечения сетевого трафика P , соблюдая при этом ограничения по: стоимостным показателям информационного потока, временным потерям и уровню помехоустойчивости, а также удовлетворяя условию:

$$P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda c_{rshu} - \lambda g_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] \rightarrow \max, \quad (2.16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (c i_{rshu} + c c_{rshu} + c g_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (t i_{rshu} + t c_{rshu} + t g_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < T_0 \\ K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (K I L_{rshu} + K C L_{rshu} + K G L_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\ \left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in S} \left| \sum_{h \in H} \left| \sum_{u \in U} x_{rshu} \right. \right. \right. \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1 \end{array} \right. \quad (2.17)$$

2.4.4 Модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений

В рамках данной модели требуется найти такой набор элементов матрицы X , который обеспечит максимальную вероятность безотказной работы при решении задач обеспечения сетевого трафика P , соблюдая при этом ограничения по: стоимостным показателям информационного потока, показателям надежности системы и уровню помехоустойчивости, а также удовлетворяя условию

$$K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (K I L_{rshu} + K G L_{rshu} + K C L_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} \rightarrow \max, \quad (2.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\
= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cc_{rshu} + cg_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\
T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\
= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tg_{rshu} + tc_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < T_0 \\
P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0 \\
\left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in H} \left| \sum_{h \in S} \left| \sum_{u \in U} x_{rshu} \right. \right. \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1
\end{array} \right. \quad (2.19)$$

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 [78-81]. Масштабирование задач влечет необходимость создания особых методов, опирающихся на вероятностные модели, машинное обучение и современные технологические инновации.

2.5. Математические модели оптимизации информационной логистики в стохастической постановке

Применение стохастического подхода в построении моделей имеет несколько подходов, один из которых - стохастическая непрерывная модель, которая более применима для описания процессов функционирования технических систем, физических явлений, что широко применяется в таких областях науки, как биология, астрономия, химия, медицина, прикладные задачи в финансовых расчетах [82].

Очевидно, что непрерывный подход не применим к СИЛ, другим подходом являются дискретно-стохастические модели, они получили свое применение в таких областях, как исследование процессов в каналах связи [83], химических

реакциях [84], в исследовании динамики распространения инфекционных заболеваний [85-88].

Существует два способа реализации дискретно-стохастических моделей:

- через конечно-разностные уравнения, где часть переменных определяется функциями случайных процессов;
- посредством вероятностных автоматов.

Для построения моделей выберем представление случайных величин в виде математического ожидания, таким образом, 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.

2.5.1 Стохастическая модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока

В данной модели величины I_{rshu} , C_{rshu} , t_{rshu} характеризуются случайным распределением с соответствующими МО. Учитывая это, для объёма сетевого трафика МО примет вид – $M[I_{rshu}]$, для стоимости передачи единицы сетевого трафика МО – $M[C_{rshu}]$, для времени передачи сетевого трафика – $M[t_{rshu}]$.

В результате исследования СМ-модели формируется представленная ниже целевая функция, ориентированная на минимизацию критерия стоимостного показателя потока:

$$C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} M[I_{rshu}] \cdot M[t_{rshu}] \cdot M[C_{rshu}] \cdot x_{rshu} \rightarrow \min_{x_{rshu} \in X} \quad (2.20)$$

Разложим случайную величину C на сумму независимых случайных величин, учитывая свойства линейности и переход к более простым вычислениям МО, запишем:

$$M[C_{rshu}] = m[ci_{rshu}] + m[cg_{rshu}] + m[cc_{rshu}]. \quad (2.21)$$

Перепишем стоимостную целевую функцию показателей информационного потока с учетом вышесказанного:

$$C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (m[ci_{rshu}] + m[cg_{rshu}] + m[cc_{rshu}]) \cdot M[I_{rshu}] \cdot M[t_{rshu}] \cdot x_{rshu} \rightarrow \min_{x_{rshu} \in X}. \quad (2.22)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tg_{rshu} + tc_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < T_0 \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0 \\ K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \end{array} \right. \cdot \quad (2.23)$$

В случае существования решения данной задачи получаем оптимальный план, для которого соблюдены требования по пороговым значениям для Т, Р, К.

2.5.2 Стохастическая модель поиска экстремума временных потерь обеспечения информационного взаимодействия

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

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

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in H} \sum_{h \in S} \sum_{u \in U} M[t_{rshu}] \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min_{x_{rshu} \in X}. \quad (2.24)$$

Разложим случайную величину T на сумму независимых случайных величин, учитывая свойства линейности и переход к более простым вычислениям МО, запишем:

$$M[t_{rshu}] = m[ti_{rshu}] + m[tg_{rshu}] + m[tc_{rshu}]. \quad (2.25)$$

Перепишем стоимостную целевую функцию показателей информационного потока с учетом вышесказанного:

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (m[ti_{rshu}] + m[tg_{rshu}] + m[tc_{rshu}]) \cdot M[t_{rshu}] \cdot M[I_{rshu}] \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min_{x_{rshu} \in X}. \quad (2.26)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cg_{rshu} + cc_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0 \\ K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \end{array} \right. \quad (2.27)$$

В случае существования решения данной задачи мы получаем оптимальный план, для которого соблюдены требования по пороговым значениям для C , P , K .

2.5.3 Стохастическая модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика

В данной модели величина t_{rshu} и λ_{rshu} характеризуются случайным распределением с соответствующими МО. Учитывая это, для времени передачи сетевого трафика – $M[t_{rshu}]$, для интенсивности потоков отказов – $M[-\lambda_{rshu}]$

В результате исследования РМ-модели формируется представленная ниже целевая функция, ориентированная на максимизацию критерия надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика:

$$P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[m[-\lambda_{rshu}] \cdot M[t_{rshu}] \cdot x_{rshu}] \rightarrow \max_{x_{rshu} \in X}. \quad (2.28)$$

Разложим случайную величину интенсивности потоков отказов $M[-\lambda_{rshu}]$ на сумму независимых случайных величин, учитывая свойства линейности и переход к более простым вычислениям МО, запишем:

$$M[-\lambda_{rshu}] = m[-\lambda i_{rshu}] + m[-\lambda g_{rshu}] + m[-\lambda c_{rshu}]. \quad (2.29)$$

Перепишем стоимостную целевую функцию показателей информационного потока с учетом вышесказанного:

$$P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp \left[[m[-\lambda i_{rshu}] + m[-\lambda g_{rshu}] + m[-\lambda c_{rshu}]] \cdot M[t_{rshu}] \cdot x_{rshu} \right] \rightarrow \max_{x_{rshu} \in X}. \quad (2.30)$$

Определим набор ограничений стоимостных характеристик, временных параметров и помехоустойчивости кодов для полученной целевой функции:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cg_{rshu} + cc_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tg_{rshu} + tc_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < T_0 \\ K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \end{array} \right. \cdot \quad (2.31)$$

В случае существования решения данной задачи мы получаем оптимальный план, для которого соблюдены требования по пороговым значениям для С, Т, К.

2.5.4 Стохастическая модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений

В данной модели величина KL_{rshu} характеризуется случайным распределением с соответствующими МО. Учитывая это, для общей помехоустойчивости – $M[KL_{rshu}]$.

Разложим случайную величину KL_{rshu} на сумму независимых случайных величин, учитывая свойства линейности и переход к более простым вычислениям МО, запишем:

$$M[KL_{rshu}] = m[KIL_{rshu}] + m[KGL_{rshu}] + m[KCL_{rshu}]. \quad (2.32)$$

В результате исследования КМ-модели формируется представленная ниже целевая функция, ориентированная на максимизацию показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений:

$$K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (m[KIL_{rshu}] + m[KGL_{rshu}] + m[KCL_{rshu}]) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} \rightarrow \max_{x_{rshu} \in X}. \quad (2.33)$$

Определим набор ограничений стоимостных характеристик, временных параметров и параметров безотказной работы для полученной целевой функции:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cg_{rshu} + cc_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tg_{rshu} + tc_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < T_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda c_{rshu} - \lambda g_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] > P_0 \end{array} \right. \quad (2.34)$$

В случае существования решения данной задачи мы получаем оптимальный план, для которого соблюдены требования по пороговым значениям для C , T , P .

Таким образом, алгоритм структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств сводится к формированию матрицы модельных решений $X_{i,g}$,

$$X_{ig} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,g} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,g} \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

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 :

$$F = C\Delta T + D\Delta T \rightarrow \min. \quad (2.36)$$

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

Далее, алгоритм структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств заключается в решении оптимизационной задачи по четырём критериям (стоимость передачи информации – C ; время доставки сообщений – T ; помехоустойчивость – K ; вероятность безотказной работы – P) при трёх ограничениях (рисунок 2.1).

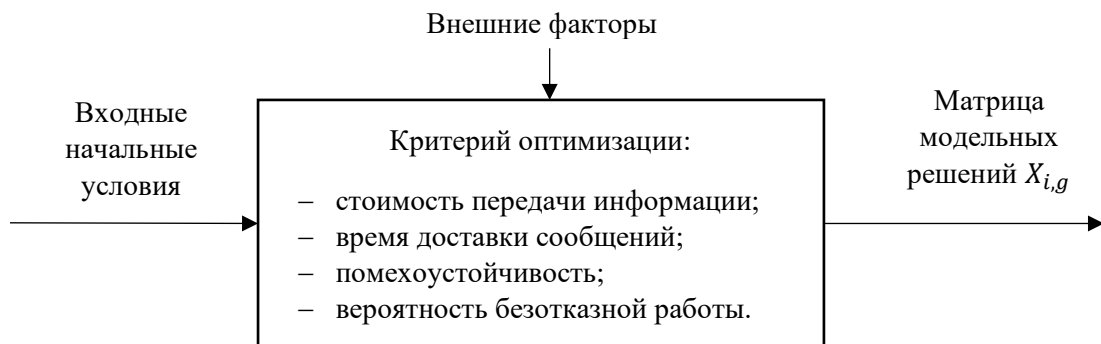


Рисунок 2.1 – Решение оптимизационной задачи формирования матрицы модельных решений $X_{i,g}$ в зависимости от выбранного критерия

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

Для этого выбираем:

- целевая функция $C \rightarrow \min$;
- система ограничений:

$$\begin{cases} T_{+1} \leq T \\ K_{+1} \leq K. \\ P_{+1} \leq P \end{cases} \quad (2.36)$$

Стандартными методами решения ЗЛП 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 Хэмминга, далее в цикле пытаемся минимизировать расстояние Хэмминга для получения оптимального решения.

2.6. Выводы по главе 2

В данной главе получены следующие основные результаты:

1. Произведено структурированное описание ключевых идентификаторов модели.
2. Разработан и обоснован класс моделей дискретной оптимизации, включающий многоиндексную структуру для решения функциональных задач.
3. Разработана модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока, с условием минимизации целевого показателя.
4. Разработана модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия, с условием минимизации целевого показателя.
5. Разработана модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика, с условием максимизации целевого показателя.

6. Разработана модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений, с условием максимизации целевого показателя.

7. На основе анализа математических моделей выполнено обоснование применения дискретно-стохастического моделирования для систем, параметры для которых не могут быть получены в явном виде.

8. Разработана стохастическая модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока, с условием минимизации целевого показателя.

9. Разработана стохастическая модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия, с условием минимизации целевого показателя.

10. Разработана стохастическая модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика, с условием максимизации целевого показателя.

11. Разработана стохастическая модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений, с условием максимизации целевого показателя.

12. Разработанные модели могут быть при необходимости дополнены для решения вопросов повышения эффективности систем и комплексов для СИЛ и систем, основанных на многокритериальном подходе в целом.

13. Приведены примеры дискретно-стохастических моделей, где случайная величина описана МО, данный подход может быть использован для описания дискретно-стохастических моделей на основе других функций случайной величины.

14. Предложенные модели стали основой для разработки комплекса программ имитационного моделирования помощи принятия решения.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ И БЫСТРОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Развитие отдаленных территорий нашей страны, таких как Северный морской путь, требуют специфичных решений в области выполнения функций информационного обеспечения. Такие системы должны отвечать ряду специфических требований, а именно: малое энергопотребление, высокая надежность, устойчивость к работе в экстремальных температурных условиях, высокая помехоустойчивость. Ранее также отмечено в 1.4, что современные сети 5G, используемые при построении высокоскоростных информационных инфраструктур, требуют дополнительного внимания помехоустойчивости и надежности. Предъявленным требованиям удовлетворяют системы, основу которых составляют вероятностные модели. Дополнительно отметим, что применение вероятностных моделей при использовании в основе информационных инфраструктур СИЛ повысит такие ее качественные характеристики, как отказоустойчивость и помехоустойчивость.

Работы в области вероятностных вычислительных систем и их моделей не новы, первые работы относятся к 1969 г. (работа Гладкого В.С. [89], 1974 г. Яковлева В.В. [90], 1978 г. Федорова Р.Ф.[91]). Основными преимуществами указанных систем являются малая аппаратная основа, повышенная помехозащищенность, способность функционировать в масштабе реального времени.

Наравне с упомянутыми преимуществами имеется и очевидный недостаток - невысокое быстродействие, вызванное необходимостью обработки длинного стохастического ряда.

В ходе исследования свойств моделей вероятностного отображения [92-96] была выявлена дополнительная возможность выполнять обнаружение и исправление ошибок, в том числе впервые был предложен и формализован метод множественного исправления ошибок для вероятно представленных данных.

Последующие изыскания в тематике помехоустойчивого кодирования привели к разработке ускоренного вероятностного преобразования и основанного на нем ускоренного вероятностного кодирования [97], позволяющего не только в разы сократить время обработки вероятностно представленной информации, но и на лету определять наличие ошибки и применять методы вероятностного помехоустойчивого кодирования.

3.1. Представление дискретных сигналов в виде вероятностных отображений

Выделяют несколько видов вероятностного отображения, но суть стохастического или вероятностного преобразования заключается в том, что любому значению параметра преобразуемой величины можно привести в соответствие некоторую вероятность. В зависимости от правила [89], в соответствии с которым это происходит, методы преобразования делятся на однолинейное однополярное, однолинейное двухполярное и двухлинейное двухполярное представления.

В рамках данной работы будет рассматриваться однолинейное однополярное вероятностное представление, далее просто вероятностное представление, как наиболее наглядное и простое для понимания. Однако все рассмотренные особенности в том или ином виде могут быть расширены при необходимости на остальные два представления – однолинейное двухполярное и двухлинейное двухполярное.

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 примет вид:

$$p'_{ij} = \begin{cases} \forall a_i \geq R_j, 1 \\ \forall a_i < R_j, 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

где p'_{ij} – j -е значение ВО из множества:

$$P' = \{p'_{i1}, p'_{i2}, p'_{i3}, \dots, p'_{ij}, \dots, p'_{ik}\}; \quad (3.2)$$

где a_i – i -е преобразуемое значение из ряда преобразуемых величин

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_n\}; \quad (3.3)$$

где i – количество входных величин для выполнения вероятностного преобразования $i = \overline{1, n}$;

n – количество ВО;

j – цикл вероятностного преобразования $j = \overline{1, k}$;

k – количество статистических испытаний;

r_j – произвольное значение из ряда:

$$R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{ik}\}. \quad (3.4)$$

Принимая во внимание выражение (3.1), запишем вероятность появления «0» и «1» в ВО:

$$P(p'_{ij} = 1) = P[r_{ij} < a_i], \quad (3.5)$$

$$P(p'_{ij} = 0) = 1 - P[r_{ij} < a_i]. \quad (3.6)$$

Произведем расчет математического ожидания для ВО с учетом дискретного распределения вероятностей:

$$M[p'_{ij}] = P(p'_{ij} = 1) = P[R_i < (a_i = r_{ij})] = F_{a_i}(R_i). \quad (3.7)$$

Учитывая выражение (3.7), можно сказать, что вероятность появления «1» в ВО есть не что иное, как среднее значение функции равно результату интегрального распределения величины R_i на уровне a_i .

Для решения поставленной задачи вводится вспомогательная величина с равномерным распределением вероятностей, описываемая функцией распределения, имеющей вид:

$$F(R) = \begin{cases} \forall r < 0, 0 \\ \forall 0 \leq r \leq 1, r, \\ \forall r > 1, 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

для которого полученное значение МО (3.7) с учетом (3.8) перепишется в виде:

$$M[p'_{ij}] = a_i. \quad (3.9)$$

Другими словами, вероятностное преобразование будет линейным.

Следствием из выражения (3.9) является возможность обратного преобразования из ВО в значение. Используя распределение величины R_i и рассчитывая среднее значение ВО, что соответствует значению интегральной функции $F_{a_i}(R_i)$, через функциональное преобразование можно найти скорректированную оценку a_i^* , для исходного параметра a_i .

В соответствии с теоремой Чебышева, оценкой, отвечающей критериям несмещенности, состоятельности и эффективности, является:

$$a_i^* = \{M[p'_{ij}]\}^* = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k p'_{ij}. \quad (3.10)$$

Формула (3.10) показывает, что при вероятностном преобразовании исходное значение определяется как отношение суммарных единичных величин к числу статистических испытаний.

3.2. Оценка помехоустойчивости вероятностного преобразования

Основным преимуществом вероятностного преобразования являются: малый аппаратный объём, повышенная помехозащищенность, способность функционировать в масштабе реального времени [98]. Однако же факт

помехоустойчивости и малого аппаратного объема является и его слабой стороной, увеличивая время обработки ВО.

Необходимо вычислить зависимость между помехоустойчивостью, она же точность, и быстродействием – количеством испытаний.

В случае рассмотрения ВО избыточность будет влиять на количество его разрядов, а это будет оказывать непосредственное влияние на точность.

Значение a_i^* , полученное в ходе вычислений по формуле (3.10), обладает свойствами асимптотической эффективности и состоятельности. Она же является не смещенной, исходя из:

$$M[a_i^*] = M\left[\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k p'_{ij}\right] = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k M[p'_{ij}] = F_{a_i}(R_i) = a_i. \quad (3.11)$$

Для вычисления погрешности ВО найдем дисперсию оценки:

$$D[a_i^*] = \frac{1}{k^2} \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^2 \left[p'_{ijl} - M[p'_{ijl}] \right]^2 P_l = \frac{1}{k} [F_{a_i}(R_i) - F_{a_i}^2(R_i)]. \quad (3.12)$$

Исходя из последнего, вычислим среднеквадратичную погрешность:

$$\sigma(a_i^*) = \frac{1}{\sqrt{k}} \sqrt{[F_{a_i}(R_i) - F_{a_i}^2(R_i)]}. \quad (3.13)$$

Принимая во внимание последнее выражение, можно утверждать, что погрешность обратно пропорциональна квадратному корню от числа испытаний, а также определяется законом распределения дополнительной случайной величины R_i .

Возникают ограничения при применении формулы (3.13) вследствие случайного характера оцениваемых вероятностных показателей. При расчете

количественных параметров важно принимать во внимание распределение оценочных значений, что позволяет установить отклонение оценки от реального показателя (как абсолютную, так и относительную погрешность) с определенной вероятностью.

В соответствии с положениями центральной предельной теоремы при достижении k значения 20-30 закон распределения оценки принимает нормальную форму, позволяя вычислить абсолютную погрешность ВО по формуле:

$$\Delta_{BO} = \sqrt{2}\Phi^{-1}(P)\sigma(a_i^*) = \frac{\sqrt{2}\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{k}} \sqrt{[F_{a_i}(R_i) - F_{a_i}^2(R_i)]}, \quad (3.14)$$

где Φ^{-1} – обратная функции Лапласа;

P – вероятность нахождения верного $F_{a_i}(R_i)$ в рамках диапазона $I_p = \{F_{a_i}^*(R_i) - \Delta_{BO}; F_{a_i}^*(R_i) + \Delta_{BO}\}$.

Относительная погрешность, если принять во внимание, что преобразованное значение a_i нормировано на единичный диапазон, будет выражаться следующим образом:

$$\gamma = \Delta_{BO} 100\%. \quad (3.15)$$

Учитывая выражения (3.14) и (3.15), уверенно можно сделать вывод, что ошибка ВО тем меньше, чем больше количество циклов преобразования, другими словами, погрешность с увеличением количества статистических испытаний уменьшается, а увеличение избыточности в виде увеличения параметра k ведет к росту помехоустойчивости.

Для нахождения количественных значений необходимо обратиться к нормальному закону, которому подчинена вспомогательная случайная величина R_i , которая далее и будет рассматриваться. С учетом этого выражение для нахождения абсолютной погрешности (3.14) примет вид:

$$\Delta_{BO} = \sqrt{2}\Phi^{-1}(P)\sigma(a_i^*) = \frac{\sqrt{2}\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{k}}\sqrt{a_i(1-a_i)}. \quad (3.16)$$

Выполнив анализ последнего выражения, имеем максимальное значение погрешности для ВО, когда a_i находится в середине диапазона $[0..1]$, то есть при $a_i = 0,5$, для которого Δ с учетом этого оценкой сверху примет вид:

$$\Delta_{BO} \leq \frac{0,7*\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{k}}. \quad (3.17)$$

При доверительном интервале $P=0.9973$ $0,7 * \Phi^{-1}(P) = 1.645$, таким образом, максимальное значение абсолютной погрешности запишется как:

$$\Delta_{BO_{max}} \leq \frac{1.645}{\sqrt{k}}, \quad (3.18)$$

а максимальное значение приведенной погрешности:

$$\gamma_{BO_{max}} \leq \frac{164.5}{\sqrt{k}}\%. \quad (3.19)$$

В случае 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 и рассчитывая, что осуществляется обеспечение погрешности в 0.39%, ВО будет нечувствительно к искажению около 700 разрядов ВО, учитывая стохастическую шумоподобную природу ВО, данное число может быть увеличено в случае автокомпенсационных помех.

3.3. Вероятностное синдромное помехоустойчивое декодирование

Для определения синдрома необходимо обратиться к понятию ошибки с точки зрения теории информации. Ошибка – это изменение кодовой последовательности в процессе передачи по каналу связи в результате воздействия на передаваемый сигнал помехи.

Ошибка может быть единичная и множественная. В случае если имеет место множественная ошибка, возможны ситуации, когда кодовая последовательность переходит в разряд допустимых и ошибка становится не обнаруживаемой.

Синдром ошибки S_i в общем виде – это вектор, вычисляемый на приемной стороне декодирующим устройством:

$$S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, \dots, s_{ij}, \dots, s_{ik}\}, \quad (3.20)$$

где: s_{ij} – вычисленное значение синдрома.

Для ВО синдром формируется из формулы вероятностного преобразования (3.1), зная последовательность значений генератора псевдослучайных чисел и выполняя их анализ, можно выделить ошибочные разряды.

Решение задачи передачи последовательности псевдослучайных чисел лежит на поверхности и не требует существенных аппаратных затрат. Данный функционал может быть реализован на регистровых генераторах псевдослучайной последовательности с предварительной загрузкой идентичной последовательности в его регистровую память.

После нахождения $a_{i_{\text{ош}}}^*$ (3.10) 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.

Процесс нахождения значений разрядов синдрома s_{ij} запишется в выражение:

$$s_{ij} = p'_{\text{ош}ij} \oplus p'_{\text{в}ij}, \quad (3.21)$$

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

$p'_{\text{в}ij}$ – значения ВО, полученные в результате повторного преобразования $a_{i\text{ош}}^*$ согласно выражению (3.10) с полным соблюдением применяемой вспомогательной последовательности R_i с учетом этого (3.10) для $p'_{\text{в}ij}$ примет вид:

$$p'_{\text{в}ij} = \begin{cases} \forall a_{i\text{ош}}^* \geq R_j, 1 \\ \forall a_{i\text{ош}}^* < R_j, 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

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

Ключевым элементом предложенной схемы является использование идентичных генераторов псевдослучайной последовательности (ГПСП) как в передающем, так и в принимающем устройстве, причем все они настроены на одну и ту же исходную кодовую комбинацию. Функционал генераторов различается: в передатчике первый ГПСП задействован в блоке, преобразующем сигнал с учетом вероятностных характеристик, а второй ГПСП в приемнике отвечает за формирование маски предполагаемых множественных ошибок. В связи с тем, что ГПСП передатчика и приёмника конгруэнтны, для упрощения записи будем использовать общее обозначение R_j .

Схема взаимодействия компонентов информационного канала представлена на приведенном ниже рисунке 3.1.

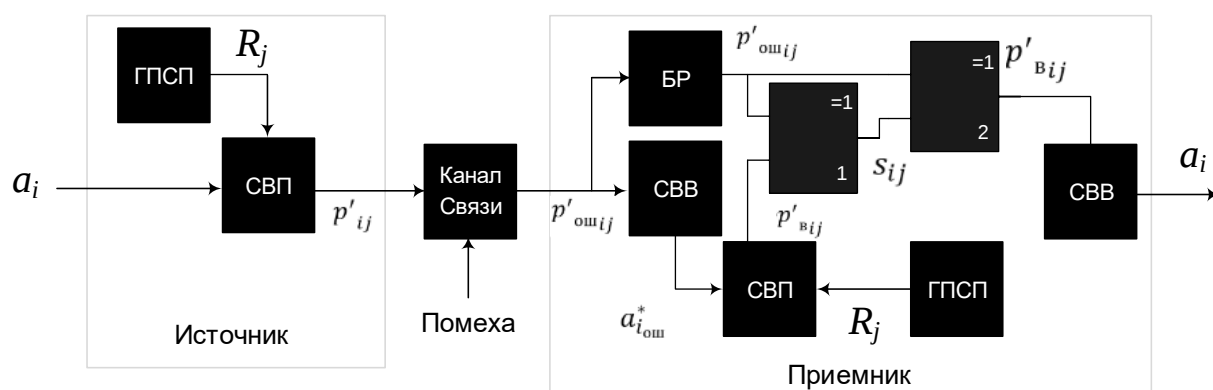


Рисунок 3.1 – Схема информационного тракта с исправлением ошибок
где: СВП – схема вероятностного преобразования;

СВВ – схема вероятностного восстановления;

ГПСП – генератор псевдослучайной последовательности;

БР – буферный регистр.

Для представления описанного процесса рассмотрим ВО в графическом виде. Полученное ВО p'_{ij} согласно (3.1) можно отобразить графически (рисунок 3.2). 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.



Рисунок 3.2 – ВО без помех

На графике 3.2 изображены 1024 разряда ВО преобразуемого значения $a_i = 42$, при диапазоне измерения значений от 0 до 100.

Рассмотрим часть ряда ВО, подверженного воздействию помехи, для наглядности взяты первые 120 разрядов, в которых случайным образом допущены искажения при передаче по каналу связи:

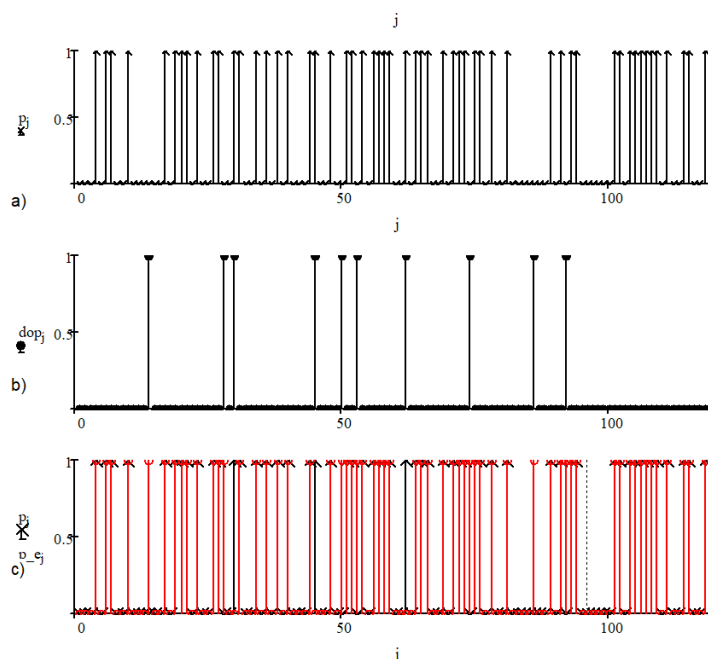


Рисунок 3.3 – Графическое отображение ВО при прохождении через канал связи с помехами

Значение ВО p'_{ij} (p_j на графике), поступающее в канал связи, изображено на рисунке 3.3 а); значения помехи (dop_j на графике), влияющие на передаваемые значения ВО, изображены на рисунке 3.3 б); разница между значениями ВО на входе в канал связи p'_{ij} (p_j на графике) и выходе $p'_{ошij}$ (p_{e_j} на графике).

Как видно из рисунка 3.3, 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'_{vij} (p_{vostj} на графике) рисунок 3.4 а).

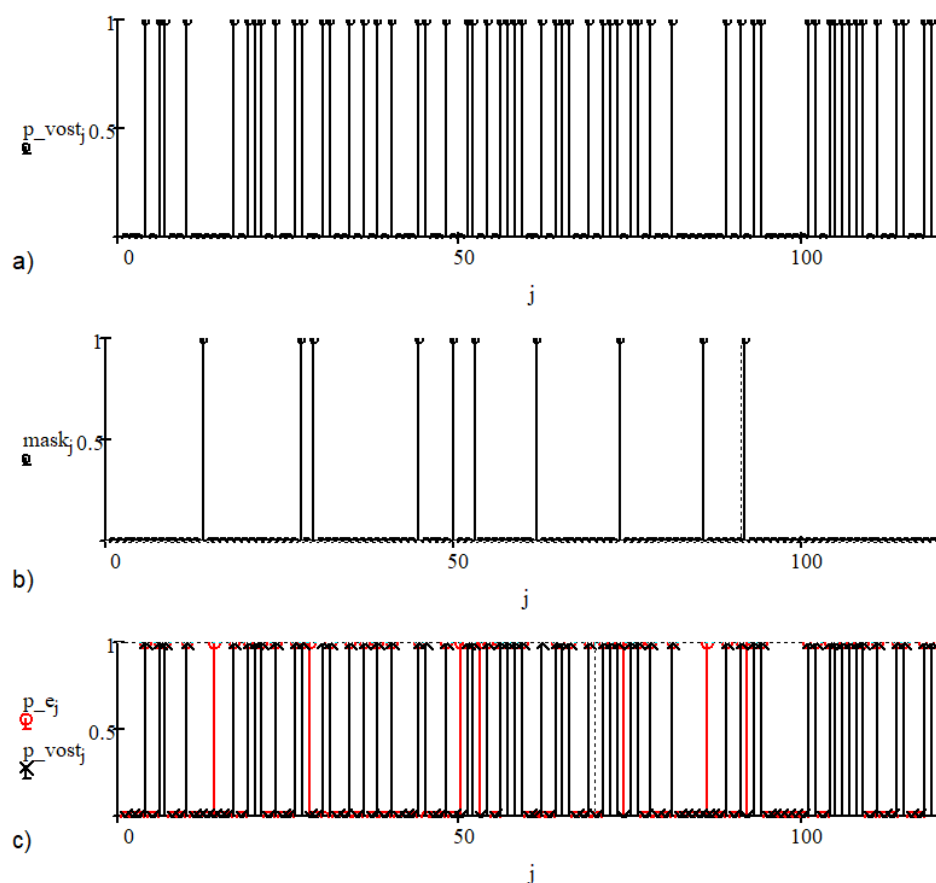


Рисунок 3.4 – Графическое отображение работы схемы с множественным восстановлением ошибки

Результатом сложения по модулю 2 полученного значения ВО с ошибкой $p'_{ошij}$ (p_ej на графике) и ВО, полученного в результате работы схемы восстановления p'_{vij} (p_vost_j на графике), согласно (3.21), получаем синдром ошибки s_{ij} ($mask_j$ на графике) рисунок 3.4 b).

Сравнив 3.3 b) и 3.4 b), видно, что количество ошибок в канале связи соответствует массе синдрома ошибок, и в том и другом случае количество равно 10. Процесс формирования синдрома на основании принятых значений ВО $p'_{ошij}$ и p'_{vij} можно видеть на рисунке 3.4 c).

Наравне с полученной эффективностью работы схемы исправления множественной ошибки стоит отметить, что данная схема, несмотря на свою крайнюю простоту и малую аппаратную емкость, дополнительно минимум в два

раза увеличит время от получения ВО до его конечной выдачи получателю в случае наличия ошибки в передаваемых значениях ВО. 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 $a_i^* = a_i$.

3.4. Быстрое вероятностное преобразование

Дальнейшее исследование свойств ВО с учетом синхронности ГПСП источника и приемника, а также с учетом конкретных ВО и выделение закономерностей выявили дополнительные свойства и возможности, такие как быстрое вероятностное преобразование.

В ходе изучения (3.1) разделена на две части, отвечающие за «0» и «1» в разрядах ВО.

Первая часть для значений ВО=1 – осуществлялась выборка соответствующих значений ГПСП $R_j^1 = \{r_n^1 | (R_j \in p'_{ij} = 1)\}$ и вторая часть для значений ВО=0 – осуществлялась выборка $R_j^0 = \{r_m^0 | (R_j \in p'_{ij} = 0)\}$, где n – количество значений ГПСП, соответствующих $p'_{ij} = 1$, а m – количество значений ГПСП, соответствующих $p'_{ij} = 0$.

Представив графически два набора $R_j^1 \in p'_{ij} = 1$ и $R_j^0 \in p'_{ij} = 0$ (рисунок 3.5.), из рисунка 3.5 видно, что значения ГПСП, при котором ВО $R_j^1 \in p'_{ij} = 1$ ($r1n_j$ по графику), расположились в нижней части графика, а значения ГПСП, при котором ВО=0, расположились в нижней части графика ($r0m_j$ по графику), при этом было преобразовано $a_i=42$ в 1024 разряда ВО, при диапазоне изменения входной величины от 0 до 100.

Это свойство дает дополнительную возможность использовать инструменты определения наличия ошибки. По анализу двух множеств, выполняя их сравнение на наличие или отсутствие пересечений, позволит определить не просто наличие,

но и выполнить локализацию ошибки. Рассмотрим множества, которые были сформированы для ВО.

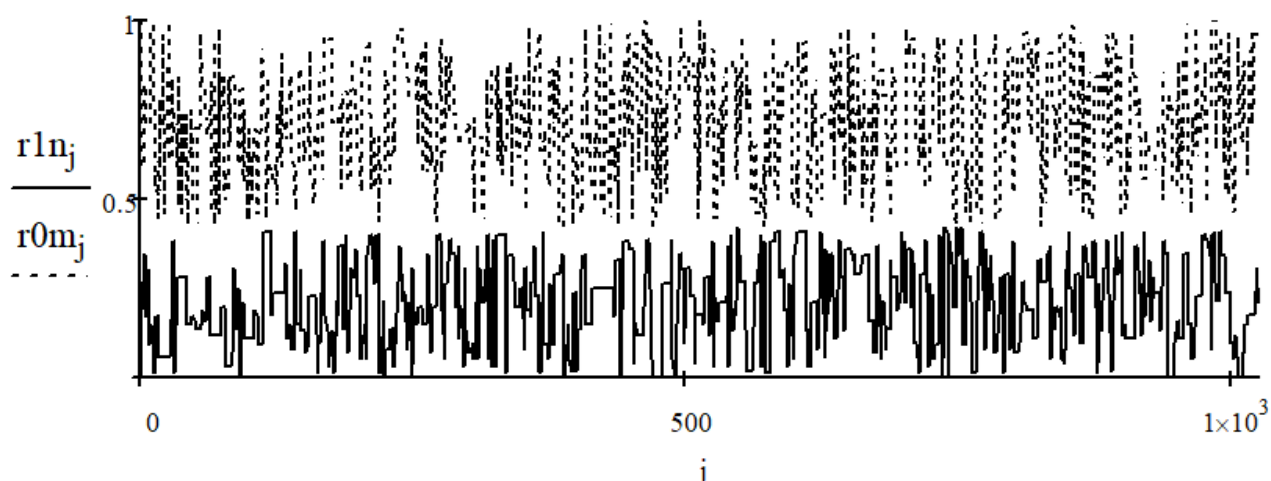


Рисунок 3.5 – Распределение вспомогательной случайной величины в зависимости от принимаемого ВО

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

$$R_j^1 \cap R_j^0 = \emptyset. \quad (3.23)$$

Необходимо отметить и то, что при безошибочной передаче значений ВО любое значения из множества вспомогательной случайной величины, при котором значение ВО принимает единичное значение R_j^1 , всегда будут меньше любого значения из множества вспомогательной случайной величины, при котором значение ВО принимает нулевое значение R_j^0 :

$$\min R_j^0 > \max R_j^1, \quad (3.24)$$

Исследование значений каждого из множеств и их отношений с учетом равномерности для ГПСП определяет свойство, согласно которому разница между

минимальным значением из множества $\min R_j^0$ вспомогательной случайной величины, при котором 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 ГПСП будет достаточно велико по отношению к количеству, на которые разбит генерируемый интервал, разница между экстремумами будет соответствовать шагу квантования входного значения в диапазоне изменения вспомогательной случайной величины.

$$\min R_j^0 - \max R_j^1 = \Delta. \quad (3.25)$$

Наличие пересечения в принимаемых множествах ВО приведет к нарушению выражений (3.23), (3.24), а для (3.25) в случае ошибки Δ будет принимать отрицательные значения. Основой для анализа присутствия ошибки являются (3.23) и (3.24). На рисунке 3.6 изображен случай, когда в принимаемом значении ВО допущены ошибки в результате формирования дополнительных множеств R_j^1 и R_j^0 , включающих r_n^1 и r_m^0 соответственно. Видно, что кривые значений r_n^1 ($r1n_j$ по графику) и r_m^0 ($r0m_j$ по графику) пересекаются в точках нахождения ошибок.

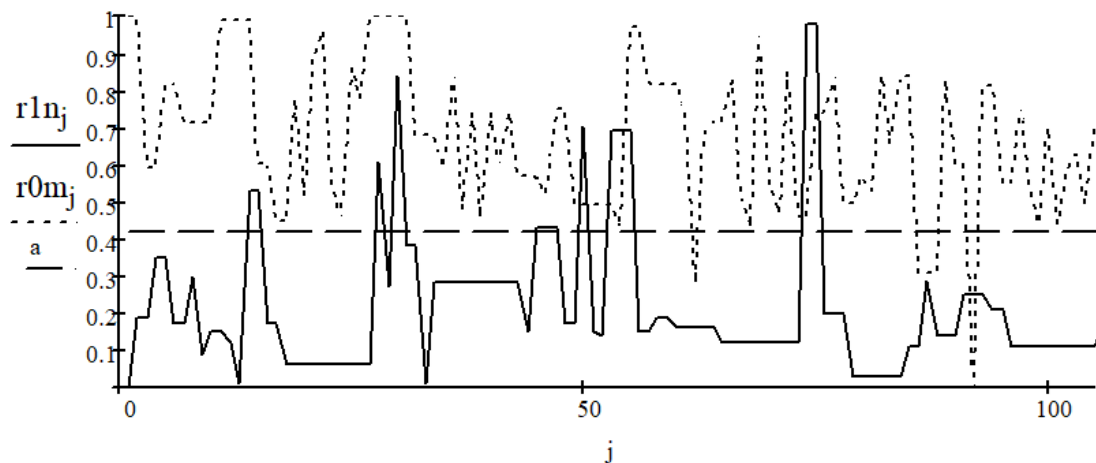


Рисунок 3.6 – Распределение вспомогательной случайной величины в зависимости от принимаемого ВО с ошибкой

Определив основные свойства вспомогательной случайной величины, относительно значений ВО стоит выделить выражение (3.25), анализируя на каждом принятом значении ВО максимальное из множества R_j^1 и минимальное из множества R_j^0 . На рисунке 3.7 показан процесс проверки условий (3.23), (3.24) и (3.25) для величины $a_i=44$, измеряемой в диапазоне от 0 до 88 при количестве генераций ГПСЧ 1800; при этом соотношение количества квантов входной величины к генерации ГПСЧ составляет чуть более 20, видно итерационное асимптотическое схождение $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$, каждый раз, когда $\Delta = 1$, $\max R_j^1 = a_i = 44$, значения $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$ на следующем шаге принимали максимальное отклонение от заданной величины и процесс повторялся. Исходя из полученного, следует, что процесс нахождения $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$ асимптотически стремится к значению преобразуемой величины $a_i = 44$ и ограничивается сверху $\min R_j^0 = a_i + \Delta$. Следует отметить, что количество завершенных итераций на приведенном графике составляет 13.

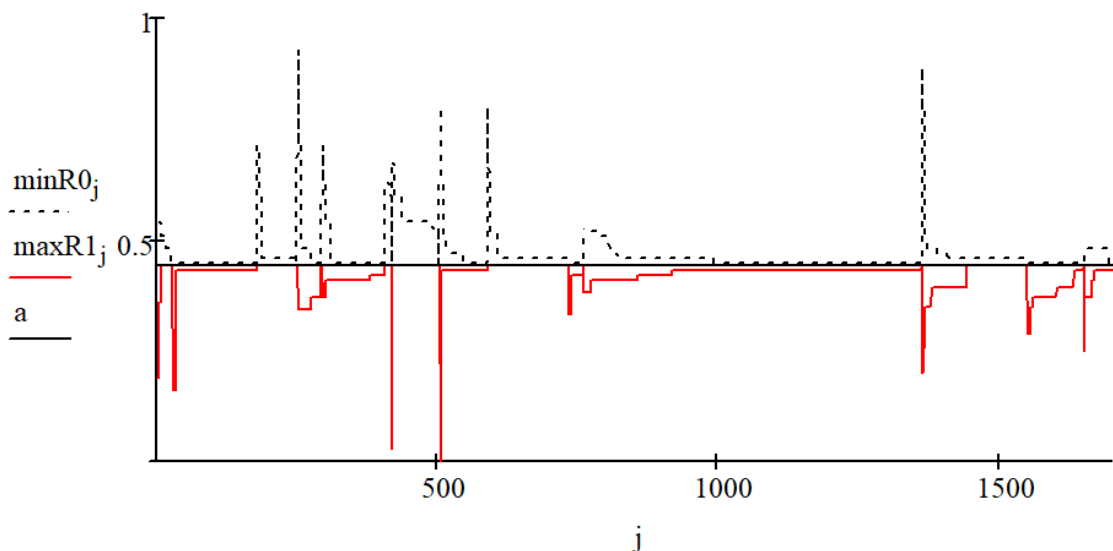


Рисунок 3.7 – Нахождение $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$ при последовательном поступлении ВО относительно преобразуемой величины

Принимая во внимание, что количество тактов ВО, обработанное на рисунке 3.7, составляет 1800, можно утверждать, что комплексное применение выражений

(3.23), (3.24), (3.25) позволяет определить наличие ошибки в передаваемой последовательности значений ВО, а также, используя простой аналитический аппарат, восстановить передаваемую величину, не прибегая к затратному с точки зрения времени выражению (3.10). Следуя заложенному в выражениях принципу на приведенном в рисунке 3.6 примере, значение передаваемой величины было найдено уже на 41 принятом значении ВО, что, в свою очередь, показывает возможность кратно повысить время восстановления ВО. Другим преимуществом применения быстрого восстановления является наличия шага квантования в выражении (3.20), который позволяет регулировать заданную точность, а для целочисленных дискретных значений, как для кода ASCII, наравне с увеличением скорости восстановления значения из ВО позволяет уйти от понятия погрешности.

На основе выражений (3.23), (3.24), (3.25) предлагается следующая схема решения (рисунок 3.8).

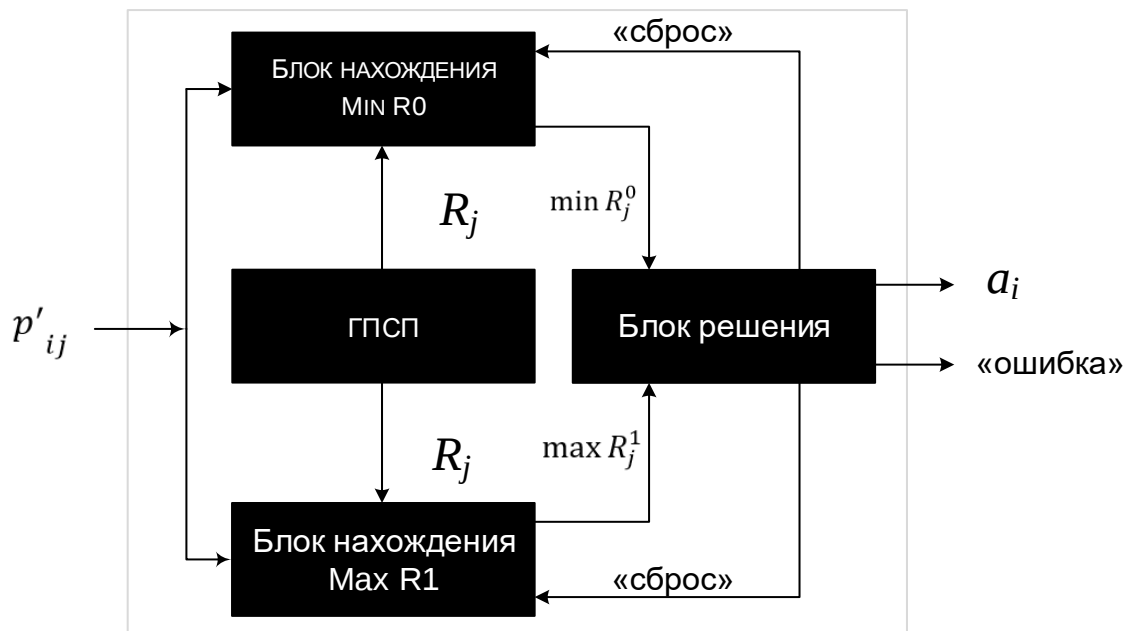


Рисунок 3.8 – Блок-схема быстрого вероятностного восстановления с определением ошибки

Как и в схеме вероятностного устройства с множественным исправлением ошибки (рисунок 3.1), в блок-схеме быстрого вероятностного восстановления основу и ключевую роль играет ГПСЧ, идентичный не только по структуре

обратных связей ГПСП передатчика, с идентичным загруженным начальным значением на регистрах. Входящие в состав блоки нахождения $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$ идентичны по элементам и состоят из компаратора и регистра для хранения значения, при этом на регистре для блока $\max R_j^1$ предварительно устанавливается минимум генерируемого интервала, а на регистре для блока $\min R_j^0$ стартовым значением устанавливается максимум. Кроме начального состояния регистров блоки отличаются связями, обеспечивающими для блока $\max R_j^1$ сравнение значения, хранимого на регистре и на ГПСП в случае поступления на вход схемы разряда ВО $p'_{ij} = 1$, если хранимое значение будет меньше выходного ГПСП, на регистр памяти записывается выход с ГПСП, в противном случае имеющееся состояние сохраняется, в свою очередь, для блока $\min R_j^0$ происходит сравнение величин хранимого на регистре с выходом ГПСП в случае поступления на вход схемы разряда ВО $p'_{ij} = 0$, если хранимое значение будет меньше выхода ГПСП, на регистр памяти записывается выход с ГПСП, в противном случае состояние регистров сохраняется.

На вход блока решения поступают значения, содержащиеся в регистрах блоков нахождения $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$, который осуществляет их анализ, в случае если $\max R_j^1 > \min R_j^0$ происходит нарушение неравенства (3.24), то блок генерирует сигнал «ошибка», при этом выполняется сброс который приводит схему в исходное состояние; если выполняется неравенство $\max R_j^1 < \min R_j^0$ (3.24), то схема будет продолжать работу до тех пор, пока разница между $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$ не станет равной шагу квантования входной величины согласно (3.20); при достижении величины на выход схемы поступает содержимое регистра $\max R_j^1$, после чего схема переводится в исходное состояние, подавая на блоки нахождения $\min R_j^0$ и $\max R_j^1$ сигнал «сброс».

Предложенная схема на рисунке 3.8, при использовании 16-разрядных ГПСП, с учетом применения двух дополнительных регистров хранения, трех компараторов, схемы вычитания и вспомогательной логики, не превышает 350

логических элементов. Это незначительно усложняет схему классического вероятностного преобразования, однако существенно ускоряет процесс восстановления значения из ВО, исключая погрешности восстановления.

Для исследования количественных характеристик создан программный комплекс, осуществляющий преобразование информации в виде кода расширенной таблицы ASCII, состоящей из 256 символов, в набор ВО, после чего выполняет его быстрое восстановление. Программный комплекс также реализует предложенный алгоритм быстрого вероятностного преобразования на базе протокола UDP стека протоколов TCP/IP, без ограничений по набору входных данных. В ходе восстановления подсчитывалось количество обработанных значений ВО до выполнения операции быстрого восстановления для каждого из символов. Применение комплекса показало 193-кратное превышение скоростных характеристик быстрого вероятностного преобразования по отношению к классическому и минимум в 2.4 – 4 раза по отношению к псевдовероятностному. Подробно полученные данные будут раскрыты в следующей главе.

3.5. Вариантный анализ быстрого вероятностного преобразования

В условиях стремительного развития цифровых коммуникаций и увеличения объемов передаваемых данных проблема обеспечения надежности и эффективности передачи информации приобретает особую значимость. Помехоустойчивое кодирование является ключевым инструментом для решения этой задачи, позволяя обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие в каналах связи. Однако разнообразие существующих методов кодирования, их различные характеристики и области применения требуют системного анализа для выбора оптимального решения в конкретных условиях.

Вариантный анализ методов помехоустойчивого кодирования позволяет сравнить их эффективность по ряду критериев, таких как корректирующая способность, избыточность, вычислительная сложность, адаптивность к различным типам помех и применимость в вероятностных моделях. Такой анализ

особенно важен при проектировании современных систем связи, работающих в условиях нестационарных и зашумленных каналов, где традиционные подходы могут оказаться недостаточно эффективными.

Целью вариантного анализа является проведение сравнительного анализа различных методов помехоустойчивого кодирования для определения их применимости в конкретных сценариях передачи данных. В рамках анализа будут рассмотрены как классические методы (коды Хэмминга, БЧХ, Рида-Соломона), так и современные подходы (LDPC, быстрое вероятностное кодирование).

При выполнении анализа необходимо выделить ключевые характеристики методов помехоустойчивого кодирования, такие как:

- 1) Корректирующая способность (количество обнаруживаемых и исправляемых ошибок).
- 2) Избыточность и скорость кода.
- 3) Вычислительная сложность реализации.
- 4) Тип корректирующих ошибок.
- 5) Адаптивность к изменяющимся условиям канала.
- 6) Применимость в вероятностных моделях.

Проведенный анализ позволит:

- Выявить сильные и слабые стороны различных методов помехоустойчивого кодирования.
- Представить рекомендации по выбору кодирования для проектирования надежных систем связи.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и оптимизации систем передачи данных в телекоммуникационных сетях, системах хранения информации и других приложениях, где требуется высокая надежность и эффективность.

Проведенный вариантный анализ позволит не только систематизировать знания о современных методах помехоустойчивого кодирования, но и представить практические рекомендации для инженеров и исследователей, работающих в области телекоммуникаций и обработки сигналов.

3.5.1 Обзор альтернатив и их описание

В качестве альтернатив выберем как классические методы помехоустойчивого кодирования, так и современные.

1. Код Рида-Соломона — это один из наиболее мощных и широко применяемых помехоустойчивых кодов, относящийся к классу недвоичных линейных блочных кодов. Разработанный в 1960 году Ирвингом Ридом и Густавом Соломоном, этот код обладает уникальной способностью исправлять множественные ошибки, включая пакетные (burst errors), что делает его незаменимым во многих современных системах связи и хранения данных.

Принцип работы:

Кодирование: Информационные символы интерпретируются как коэффициенты полинома $p(x)$ степени $k-1$; кодовый полином $s(x)$ формируется путем добавления проверочных символов, вычисленных через значения $p(x)$ в фиксированных точках поля Галуа.

Декодирование: Алгоритм Берлекэмп-Мессе или Евклида находит локаторы ошибок; Метод Форни корректирует ошибочные символы.

Преимущества:

- исправление пакетных ошибок (эффективен в каналах с замираниями и импульсными помехами);
- высокая эффективность (оптимален для каналов с высоким уровнем шумов);
- широкие возможности настройки (поддерживает различные длины блоков и уровни избыточности).

Недостатки:

- вычислительная сложность (требует значительных ресурсов для кодирования/декодирования);
- избыточность (добавляет больше проверочных бит по сравнению с некоторыми другими кодами).

Код Рида-Соломона остается «золотым стандартом» в задачах, требующих надежной коррекции пакетных ошибок. Несмотря на появление более современных кодов (LDPC, быстрое вероятностное восстановление), его простота реализации и проверенная эффективность обеспечивают широкое применение в критически важных системах. Дальнейшее развитие связано с оптимизацией вычислительной сложности и интеграцией в гибридные схемы кодирования [99, 100].

2. Код Хэмминга – один из первых и наиболее известных помехоустойчивых кодов, разработанный Ричардом Хэммингом в 1950 году. Это двоичный линейный блочный код, способный обнаруживать и исправлять одиночные ошибки в переданных данных. Благодаря простоте реализации и эффективности код Хэмминга широко применяется в компьютерной технике и системах связи.

Принцип работы:

Кодирование: определение позиций проверочных бит – проверочные биты размещаются на позициях, равных степеням двойки (1, 2, 4, 8...); расчёт значений проверочных бит – каждый проверочный бит контролирует определённые биты данных через операцию XOR (чётность).

Декодирование: вычисление синдрома – повторно рассчитываются проверочные биты на стороне приёмника; сравнение с полученными проверочными битами даёт синдром (число, указывающее на позицию ошибки); исправление – если синдром не равен нулю, инвертируется бит в ошибочной позиции.

Преимущества:

- простота реализации (алгоритмы кодирования/декодирования требуют минимальных вычислений);
- низкая избыточность (по сравнению с другими кодами);
- эффективность для редких ошибок (идеален для каналов с низкой вероятностью ошибок (коэффициент ошибок по битам $BER < 10^{-6}$)).

Недостатки:

- ограниченная корректирующая способность (не может исправлять множественные ошибки в одном блоке);
- чувствительность к пакетным ошибкам (если ошибки затрагивают несколько бит, код становится неэффективным).

Код Хэмминга – это классическое решение для исправления одиночных ошибок с минимальными накладными расходами. Несмотря на ограничения, он остаётся востребованным в системах, где вероятность ошибок мала, а простота реализации критична. Для более зашумлённых каналов применяются его модификации или комбинации с другими кодами [105, 106].

3. Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга – это один из наиболее мощных циклических помехоустойчивых кодов, способных исправлять множественные ошибки в двоичных данных. Разработанный в 1959–1960 годах, он обобщает идеи кодов Хэмминга и Рида-Соломона, сочетая гибкость настройки и высокую корректирующую способность.

Принцип работы:

Кодирование: представление данных – информационные биты интерпретируются как коэффициенты полинома $p(x)$; генерация кодового слова – умножение на образующий полином $g(x)$ (имеет корни в поле Галуа).

Декодирование: вычисление синдрома – анализ остатка от деления принятого слова на $g(x)$; поиск ошибок – алгоритм Берлекэмп-Мессе (нахождение локаторов ошибок), метод Ченя (поиск позиций ошибок по локаторам); исправление – инверсия ошибочных битов.

Преимущества:

- исправление множественных ошибок – эффективен в каналах с высоким уровнем шума;
- настраиваемость – параметры (n, k, t) адаптируются к условиям канала;
- эффективность – лучше кодов Хэмминга при сравнимой избыточности.

Недостатки:

- вычислительная сложность – алгоритмы декодирования требуют операций в полях Галуа;

- ограничение на длину блока – n должно быть вида 2^m-1 .

Код БЧХ — это «золотая середина» между простыми кодами (Хэмминг) и сложными (LDPC). Его способность исправлять множественные ошибки с предсказуемой избыточностью делает его незаменимым в системах хранения данных и цифровой связи. Код БЧХ остаётся актуальным благодаря балансу между производительностью и сложностью реализации [107].

4. LDPC-коды – низкоплотностные коды с проверкой на чётность (Low-Density Parity-Check, LDPC) – это класс мощных помехоустойчивых кодов, способных приближаться к пределу Шеннона по пропускной способности канала. Изобретённые Робертом Галлагером в 1960-х годах и заново открытые в 1990-х, эти коды стали стандартом в современных системах связи благодаря своей исключительной эффективности.

Принцип работы:

Кодирование: построение матрицы H – используются алгоритмы для создания разреженной матрицы; генерация кодового слова – решение системы линейных уравнений $H \cdot c^T = 0$.

Декодирование: итеративное декодирование – алгоритм Belief Propagation (BP) – передача «вероятностных сообщений» между узлами графа Таннера; мин-сумма – упрощённая версия BP для уменьшения вычислений; критерий остановки – проверка условия $H \cdot \hat{c}^T = 0$ или достижение максимума итераций.

Преимущества:

- близость к пределу Шеннона – эффективность в пределах 0.0045 дБ от теоретического предела (для некоторых устройств);

- параллелизм – подходит для аппаратной реализации (FPGA, ASIC);

- гибкость – поддержка различных скоростей и длин блоков (от сотен до десятков тысяч бит).

Недостатки:

- сложность проектирования – требуется тщательный подбор матрицы H для избегания «петель» в графе;
- задержка декодирования – итеративные алгоритмы могут требовать десятки циклов;
- порог эффекта «пола ошибок» (Error Floor) – при высоких SNR вероятность ошибок перестаёт снижаться.

LDPC-коды – это современный стандарт для высокоскоростных и надёжных систем связи. Их способность работать в условиях, близких к теоретическим пределам, делает их незаменимыми в 5G, Wi-Fi 6 и других перспективных технологиях. LDPC – это не просто код, а целое семейство технологий, продолжающих развиваться для будущих коммуникационных систем [108, 109].

5. Быстрое вероятностное восстановление (FPR, Fast Probabilistic Recovery) – это современный метод обработки ошибок в системах связи, основанный на вероятностных моделях и алгоритмах машинного обучения. В отличие от классических детерминированных подходов (например, кодов Хэмминга или LDPC), FPR использует статистические закономерности ошибок для их предсказания и коррекции с минимальными задержками.

Основные принципы:

1) Вероятностная модель ошибок: ошибки рассматриваются как случайный процесс с известным распределением (например, Пуассона для одиночных ошибок, Гаусса для шума). Используется априорная информация о канале (история ошибок, SNR).

2) Алгоритмы восстановления: байесовские методы – оценка вероятности ошибки для каждого бита/символа. Марковские цепи – предсказание позиций ошибок на основе предыдущих состояний. Градиентный спуск в пространстве вероятностей – оптимизация функции потерь для минимизации неопределённости.

3) Гибридный подход – комбинация с классическими кодами (например, LDPC) для коррекции остаточных ошибок.

Преимущества:

- высокая скорость обработки;

- адаптивность к изменяющимся условиям канала;
- энергоэффективность;
- совместимость с современными технологиями;
- эффективность в нестационарных каналах.

Недостатки:

- зависимость от точности модели;
- высокая сложность реализации;
- ограниченная универсальность;
- проблема «ложной коррекции»;
- ограничения при сверхвысоких скоростях.

Быстрое вероятностное восстановление – это прорывной подход, который переводит коррекцию ошибок из области детерминированных алгоритмов в область статистики и машинного обучения. Несмотря на молодость технологии, её потенциал для снижения задержек и адаптации к сложным каналам делает FPR кандидатом в стандарты будущего [106, 107, 108].

3.5.2 Критерии сравнения альтернатив

1. Вероятность ошибки – как часто код допускает неисправленные ошибки.
2. Избыточность – отношение полезных бит к числу передаваемых.
3. Сложность кодирования – вычислительные затраты, сложность алгоритма.
4. Тип корректируемых ошибок – одиночные, множественные, пакетные.
5. Адаптивность к вероятности искажениям – способность работать с нестационарными помехами.

6. Применимость в вероятностных моделях – эффективность при вероятностном представлении данных.

3.5.3 Иерархия целей

Конечной целью вариантного анализа становится предпочтение оптимального метода кодирования с исправлением ошибок, который демонстрирует наилучшие показатели коррекции ошибок при работе с данными,

представленными в вероятностной форме, с учетом вычислительной сложности, уровня избыточности и устойчивости к шумам в канале связи.

Полная простая иерархия приведена на рисунке 3.9.

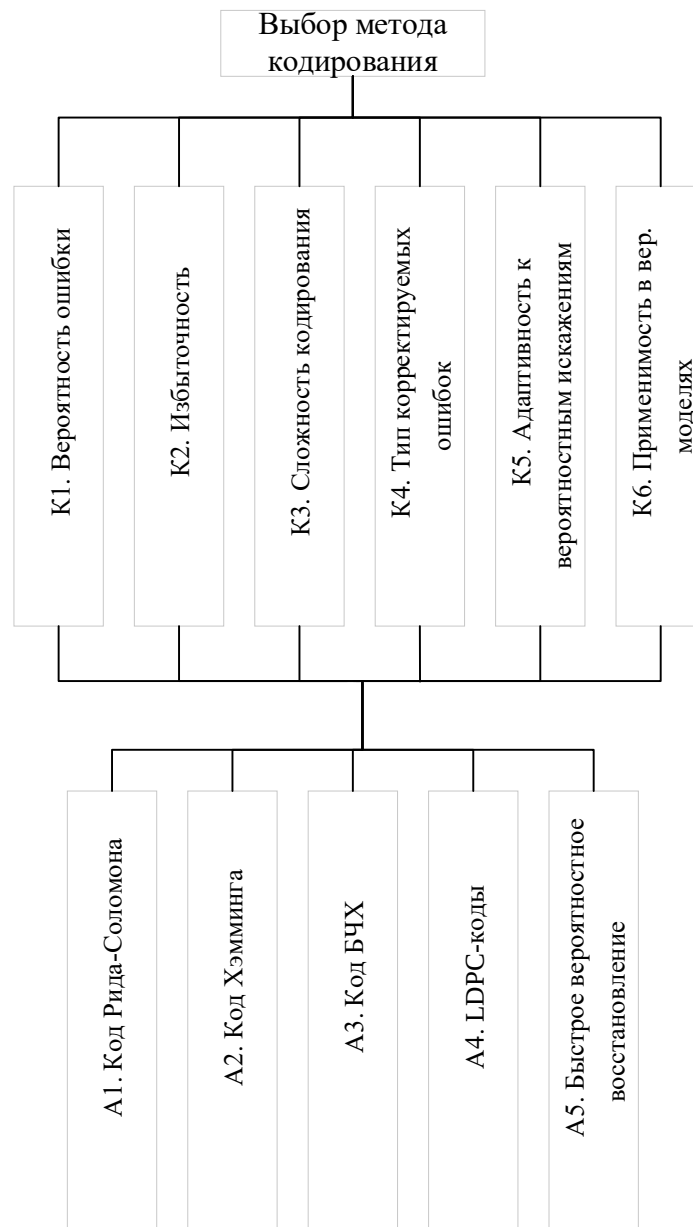


Рисунок 3.9 – Полная простая иерархия

Альтернативы:

A1: Код Рида-Соломона;

A2: Код Хэмминга;

A3: Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга;

A4: LDPC;

А5: Быстрое вероятностное восстановление;

Критерии:

К1: Вероятность ошибки;

К2: Избыточность;

К3: Сложность кодирования;

К4: Тип корректируемых ошибок;

К5: Адаптивность к вероятности искажениям;

К6: Применимость в вероятностных моделях.

3.5.4 Построение матрицы попарных сравнений второго уровня

Построим матрицу попарных сравнений второго уровня (Таблица 3.1). Каждому субъективному суждению будем давать количественную оценку, пользуясь шкалой относительной важности.

Таблица 3.1 – Матрица попарных сравнений

Критерий		К1	К2	К3	К4	К5	К6
К1	Вероятность ошибки	1	2	2	3	3	5
К2	Избыточность	1/2	1	2	3	3	5
К3	Сложность кодирования	1/2	1/2	1	3	3	5
К4	Тип корректируемых ошибок	1/3	1/3	1/3	1	1	3
К5	Адаптивность к вероятности искажения	1/3	1/3	1/3	1	1	3
К6	Применимость в вероятностных моделях	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1

Вычислим вес каждого критерия и их сумму по формулам (3.26), (3.27), соответственно.

$$b_i = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a_{ik}}, i = 1, n, \quad (3.26)$$

$$B = \sum_{i=1}^n b_i. \quad (3.27)$$

Полученный по формуле (3.26) столбец чисел нормализуется делением каждого числа b_i на сумму B всех чисел столбца (3.28), в результате получаем значения компонент вектора локальных приоритетов (3.29). Вышеперечисленные данные вычислены и представлены на рисунке 3.10.

$$x_i = \frac{b_i}{B}, \quad (3.28)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (3.29)$$

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	b _i	B	x _i	X
K1	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	5,00	2,3762	7,4460	0,3187	1,0000
K2	0,50	1,00	2,00	3,00	3,00	5,00	1,8860		0,2530	
K3	0,50	0,50	1,00	3,00	3,00	5,00	1,4969		0,2008	
K4	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,6934		0,0930	
K5	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,6934		0,0930	
K6	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,3101		0,0415	

Рисунок 3.10 – Матрица попарных сравнений

Таблица 3.2 – Численные оценки предпочтений критериев ЛПР

Критерий		Место	Вес
K1	Вероятность ошибки	1	0,3187
K2	Избыточность	2	0,2530
K3	Сложность кодирования	3	0,2008
K4	Тип корректируемых ошибок	4	0,0930
K5	Адаптивность к вероятности искажения	5	0,0930
K6	Применимость в вероятностных моделях	6	0,0416

Проверяем согласованность (нормализацию) локальных приоритетов (рисунок 3.11).

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	bi	B	xi	X	yi	λ	λ_{max}
K1	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	5,00	2,3762	7,4460	0,3187	1,0000	2,87	0,9136	6,2189
K2	0,50	1,00	2,00	3,00	3,00	5,00	1,8860		0,2530		4,37	1,1046	
K3	0,50	0,50	1,00	3,00	3,00	5,00	1,4969		0,2008		5,87	1,1778	
K4	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,6934		0,0930		11,33	1,0540	
K5	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,6934		0,0930		11,33	1,0540	
K6	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,3101		0,0415		22,00	0,9149	
											ИС	0,0438	
											ОС	3,5300	

Рисунок 3.11 – Проверка нормализации,

где y_i вычисляется по формуле (3.30), наибольшее собственное значение (λ_{max}) по формуле (3.31), индекс согласованности (ИС) по формуле (3.32) и отношение согласованности (ОС) по формуле (3.33).

Вычисленное отношение согласованности - в пределах приемлемой величины, это означает, что экспертом исследуемой задачи были вынесены приемлемые суждения.

$$y_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}, k = 1, n, \quad (3.30)$$

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad (3.31)$$

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (3.32)$$

$$ОС = \frac{ИС}{СС} * 100\%. \quad (3.33)$$

После построения матрицы второго уровня необходимо построить матрицу попарных сравнений третьего уровня альтернатив (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Матрица попарных сравнений 3-го уровня

Альтернативы		A1	A2	A3	A4	A5
A1	Код Рида-Соломона	1	5	3	2	1/2
A2	Код Хэмминга	1/5	1	1/3	1/5	1/7
A3	Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	1/3	3	1	1/3	1/5
A4	LDPC	1/2	5	3	1	1/2
A5	Быстрое вероятностное восстановление	2	7	5	2	1

Для матрицы 3-го уровня также вычисляются значения по формулам (3.26 – 3.33), результаты представлены на рисунке 3.12.

	A1	A2	A3	A4	A5	bi	B	xi	X	yi	λ	λmax
A1	1,00	5,00	3,00	2,00	0,50	1,7187	6,5755	0,2613	1,0000	4,03	1,0542	5,1112
A2	0,20	1,00	0,33	0,20	0,14	0,2858		0,0435		21,00	0,9125	
A3	0,33	3,00	1,00	0,33	0,20	0,5818		0,0885		12,33	1,0912	
A4	0,50	5,00	3,00	1,00	0,50	1,3025		0,1981		5,53	1,0961	
A5	2,00	7,00	5,00	2,00	1,00	2,6867		0,4086		2,34	0,9572	
										ИС	0,0279	
										ОС	2,4869	

Рисунок 3.12 – Матрица попарных сравнений 3-го уровня

Построение матриц попарных сравнений 3-го уровня по критериям представлено на рисунках 3.13 – 3.18, вектора приоритетов - в таблицах 3.4 – 3.9.

Таблица 3.4 – Вектора приоритетов по критерию K1

Альтернатива		Место	Вес
A1	Код Рида-Соломона	3	0,1685
A2	Код Хэмминга	5	0,0355
A3	Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	4	0,0746
A4	LDPC	1	0,3607
A5	Быстрое вероятностное восстановление	1	0,3607

Отношение согласованности выполняется ($ОС \leq 10\%$).

K1	A1	A2	A3	A4	A5	bi	B	xi	X	yi	λ	λmax
A1	1,00	7,00	3,00	0,33	0,33	1,1846	7,0327	0,1685	1,0000	7,48	1,2594	5,1482
A2	0,14	1,00	0,33	0,14	0,14	0,2498		0,0355		25,00	0,8878	
A3	0,33	3,00	1,00	0,20	0,20	0,5253		0,0746		14,33	1,0706	
A4	3,00	7,00	5,00	1,00	1,00	2,5365		0,3607		2,68	0,9652	
A5	3,00	7,00	5,00	1,00	1,00	2,5365		0,3607		2,68	0,9652	
										ИС	0,0370	
										ОС	3,3094	

Рисунок 3.13 – Матрица попарных сравнений по критерию K1

Таблица 3.5 – Вектора приоритетов по критерию К2

Альтернатива		Место	Вес
A1	Код Рида-Соломона	2	0,2584
A2	Код Хэмминга	4	0,1073
A3	Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	5	0,0564
A4	LDPC	3	0,2492
A5	Быстрое вероятностное восстановление	1	0,3288

Отношение согласованности выполняется ($OC \leq 10\%$).

K2	A1	A2	A3	A4	A5	bi	B	xi	X	yi	λ	λmax
A1	1,00	3,00	3,00	1,00	1,00	1,5519	6,0055	0,2584	1,0000	3,67	0,9475	5,1412
A2	0,33	1,00	3,00	0,33	0,33	0,6444		0,1073		10,33	1,1087	
A3	0,33	0,33	1,00	0,20	0,20	0,3385		0,0564		17,00	0,9582	
A4	1,00	3,00	5,00	1,00	0,50	1,4963		0,2492		4,53	1,1295	
A5	1,00	3,00	5,00	2,00	1,00	1,9744		0,3288		3,03	0,9973	
										ИС	0,0353	
										ОС	3,1539	

Рисунок 3.14 – Матрица попарных сравнений по критерию К2

Таблица 3.6 – Вектора приоритетов по критерию К3

Альтернатива		Место	Вес
A1	Код Рида-Соломона	4	0,0782
A2	Код Хэмминга	1	0,4049
A3	Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	3	0,1646
A4	LDPC	5	0,0454
A5	Быстрое вероятностное восстановление	2	0,3069

Отношение согласованности выполняется ($OC \leq 10\%$).

K3	A1	A2	A3	A4	A5	bi	B	xi	X	yi	λ	λmax
A1	1,00	0,20	0,33	3,00	0,20	0,5253	6,7271	0,0782	1,0000	14,33	1,1192	5,2728
A2	5,00	1,00	3,00	5,00	2,00	2,7241		0,4049		2,23	0,9044	
A3	3,00	0,33	1,00	5,00	0,33	1,1076		0,1646		7,53	1,2403	
A4	0,33	0,20	0,20	1,00	0,20	0,3056		0,0454		19,00	0,8632	
A5	5,00	0,50	3,00	5,00	1,00	2,0645		0,3069		3,73	1,1457	
										ИС	0,0682	
										ОС	6,0919	

Рисунок 3.15 – Матрица попарных сравнений по критерию К3

Таблица 3.7 – Вектора приоритетов по критерию К4

Альтернатива		Место	Вес
A1	Код Рида-Соломона	2	0,2831
A2	Код Хэмминга	5	0,0440
A3	Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	4	0,0809
A4	LDPC	3	0,2552
A5	Быстрое вероятностное восстановление	1	0,3368

Отношение согласованности выполняется ($OC \leq 10\%$).

K4	A1	A2	A3	A4	A5	bi	B	xi	X	yi	λ	λmax
A1	1,00	7,00	3,00	2,00	0,50	1,8384	6,4933	0,2831	1,0000	3,98	1,1257	5,3088
A2	0,14	1,00	0,33	0,20	0,20	0,2857		0,0440		21,00	0,9240	
A3	0,33	3,00	1,00	0,20	0,20	0,5253		0,0809		14,33	1,1595	
A4	0,50	5,00	5,00	1,00	1,00	1,6572		0,2552		4,40	1,1230	
A5	2,00	5,00	5,00	1,00	1,00	2,1867		0,3368		2,90	0,9766	
										ИС	0,0722	
										ОС	6,8957	

Рисунок 3.16 – Матрица попарных сравнений по критерию К4

Таблица 3.8 – Вектора приоритетов по критерию К5

Альтернатива		Место	Вес
A1	Код Рида-Соломона	3	0,1588
A2	Код Хэмминга	5	0,0383
A3	Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	4	0,0753
A4	LDPC	1	0,3638
A5	Быстрое вероятностное восстановление	1	0,3638

Отношение согласованности выполняется ($OC \leq 10\%$).

K5	A1	A2	A3	A4	A5	bi	B	xi	X	yi	λ	λmax
A1	1,00	5,00	3,00	0,33	0,33	1,1076	6,9730	0,1588	1,0000	7,53	1,1966	5,1123
A2	0,20	1,00	0,33	0,14	0,14	0,2671		0,0383		23,00	0,8811	
A3	0,33	3,00	1,00	0,20	0,20	0,5253		0,0753		14,33	1,0798	
A4	3,00	7,00	5,00	1,00	1,00	2,5365		0,3638		2,68	0,9774	
A5	3,00	7,00	5,00	1,00	1,00	2,5365		0,3638		2,68	0,9774	
										ИС	0,0226	
										ОС	2,3319	

Рисунок 3.17 – Матрица попарных сравнений по критерию К5

Таблица 3.9 – Вектора приоритетов по критерию К6

Альтернатива		Место	Вес
A1	Код Рида-Соломона	3	0,1134
A2	Код Хэмминга	5	0,0475
A3	Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	4	0,1110
A4	LDPC	2	0,2817
A5	Быстрое вероятностное восстановление	1	0,4464

Отношение согласованности выполняется ($OC \leq 10\%$).

K6	A1	A2	A3	A4	A5	bi	B	xi	X	yi	λ	λmax
A1	1,00	2,00	1,00	0,33	0,33	0,7402	6,5269	0,1134	1,0000	8,50	0,9640	5,2522
A2	0,50	1,00	0,20	0,20	0,14	0,3099		0,0475		22,00	1,0444	
A3	1,00	5,00	1,00	0,20	0,20	0,7248		0,1110		12,20	1,3547	
A4	3,00	7,00	5,00	1,00	0,20	1,8384		0,2817		3,73	1,0515	
A5	3,00	7,00	5,00	2,00	1,00	2,9136		0,4464		1,88	0,8376	
										ИС	0,0630	
										ОС	5,6310	

Рисунок 3.18 – Матрица попарных сравнений по критерию К6

Анализ количества мест, занятых каждой из альтернатив, свидетельствует о некотором превосходстве метода быстрое вероятностное восстановление (четыре первых места и одно второе место) над LDPC-кодами, далее следуют код Рида-Соломона, код Хэмминга и код БЧХ. Однако окончательный вывод о превосходстве той или иной альтернативы пока сделать нельзя.

Таблица 3.10 – Анализ количества мест альтернатив

Альтернатива	Место				
	1	2	3	4	5
A1. Код Рида-Соломона	-	2	2	1	-
A2. Код Хэмминга	1	-	-	1	3
A3. Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга	-	-	1	3	1
A4. LDPC	2	-	2	-	1
A5. Быстрое вероятностное восстановление	4	1	-	-	-

На рисунке 3.19 представлен результат расчета синтеза глобальных приоритетов.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	V
x1	0,1685	0,2584	0,0782	0,2831	0,1588	0,1134	0,1806
x2	0,0355	0,1073	0,4049	0,0440	0,0383	0,0475	0,1294
x3	0,0746	0,0564	0,1646	0,0809	0,0753	0,1110	0,0902
x4	0,3607	0,2492	0,0454	0,2552	0,3638	0,2817	0,2564
x5	0,3607	0,3288	0,3069	0,3368	0,3638	0,4464	0,3434
zi	0,3186	0,2530	0,2008	0,0930	0,0930	0,0416	1
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	
q1	29,73	36,20	8,70	14,58	8,18	2,61	
q2	8,74	20,98	62,84	3,16	2,75	1,53	
q3	26,34	15,81	36,63	8,34	7,76	5,12	
q4	44,83	24,59	3,56	9,26	13,20	4,57	
q5	33,46	24,22	17,94	9,12	9,85	5,41	

Рисунок 3.19 – Синтез глобальных приоритетов

Чтобы определить согласованность всей иерархии, нужно воспользоваться формулой (3.34) вдоль каждой строки, также проведем проверку корректности (формула 3.35).

$$OC_{\text{иерархии}} = \frac{\sum_i^n x_i * IC_i}{CC(m)} * 100\%, \quad (3.34)$$

$$\sum_{i=1}^n V^{M_j} = 1. \quad (3.35)$$

Таблица 3.11 – Удельные веса критериев в значение функции полезности

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
$q_i^{M_1}$	29,73%	36,20%	8,70%	14,58%	8,18%	2,61%
$q_i^{M_2}$	8,74%	20,98%	62,84%	3,16%	2,75%	1,53%
$q_i^{M_3}$	26,34%	15,81%	36,63%	8,34%	7,76%	5,12%
$q_i^{M_4}$	44,83%	24,59%	3,56%	9,26%	13,20%	4,57%
$q_i^{M_5}$	33,46%	24,22%	17,94%	9,12%	9,85%	5,41%

В таблице 3.11 представлены удельные веса критериев в значение функции полезности V .

Из таблицы 3.11 следует:

- Код Рида-Соломона (M1) основной вклад (36,20%) получил за счет критерия «K2 Избыточность», также немалый вклад (29,73%) - за счет «K1 Вероятность ошибки», ранжирование по местам в зависимости от вклада выглядит следующим образом: K1– 3, K2– 1, K3– 4, K4– 1, K5– 3, K6– 4, сумма рангов – 16;
- Код Хэмминга (M2) наибольший вклад (62,84%) - за счет критерия «K3 Сложность кодирования», остальные критерии внесли малый вклад по сравнению с другими методами, ранжирование по местам в зависимости от вклада: K1– 5, K2– 4, K3– 1, K4– 5, K5– 5, K6– 5, сумма рангов – 25;
- Код Боуза-Чоудхури-Хоквинга (M3) - наибольший вклад (36,63%) - за счет критерия «K3 Сложность кодирования», также немалый вклад (26,34%) - за счет «K1 Вероятность ошибки», ранжирование по местам в зависимости от вклада: K1– 4, K2– 5, K3– 2, K4– 5, K5– 5, K6– 5, сумма рангов – 21;
- LDPC-коды (M4) основной вклад (44,83%) - за счет критерия «K1 Вероятность ошибки», ранжирование по местам в зависимости от вклада: K1– 1, K2– 2, K3– 5, K4– 2, K5– 1, K6– 3, сумма рангов – 14;
- Быстрое вероятностное восстановление (M5) (33,46%) - за счет критерия «K1 Вероятность ошибки», также немалый вклад (24,22%) - за счет «K2 Избыточность», ранжирование по местам в зависимости от вклада: K1– 2, K2– 3, K3– 3, K4– 3, K5– 2, K6– 1, сумма рангов – 14.

Таким образом применение вариантного анализа на основе метода анализа иерархий показало, что в определенных случаях быстрое вероятностное восстановление (БВВ) сопоставимо или имеет небольшое преимущество над другими методами помехоустойчивого кодирования. Ранжирование по местам в зависимости от вклада методов показывает преимущества БВВ. Для БВВ сумма рангов сопоставима с LDPC-кодом, а по отношению к остальным данный

показатель лучше на 14 – 78%. Также, проанализировав другие методы, можно сделать вывод, что метод помехоустойчивого кодирования быстрое вероятностное восстановление представляет собой эффективную альтернативу существующим подходам, сочетающую высокую помехоустойчивость, скорость восстановления и минимальные аппаратные затраты.

3.6. Выводы по главе 3

В данной главе получены следующие основные результаты:

1. С применением численных методов найдены основы помехоустойчивости классического вероятностного представления, с позиции нативных свойств, заложенных принципами точности восстановления.
2. Предложено использование конгруэнтных ГПСП источника и приёмника для повышения помехоустойчивости вероятностного отображения и метод синдромного определения маски множественной ошибки. Отмечена эффективность и простота применяемого метода.
3. Предложено схемотехническое решение, реализующее метод синдромного декодирования ошибки.
4. На основе применения конгруэнтных ГПСП выработан метод быстрого вероятностного преобразования, 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.
5. Предложенный метод быстрого вероятностного преобразования нивелирует недостатки классического вероятностного преобразования, связанного с необходимостью обработки большого количества разрядов ВО, тем самым делается возможным применение вероятностных систем в СИЛ, позволяя повысить их надежность и помехоустойчивость.
6. Предложено схемотехническое решение быстрого вероятностного восстановления с определением ошибки. Применение предложенного комплекса

показало 193-кратное превышение скоростных характеристик быстрого вероятностного преобразования по отношению к классическому и минимум в 2.4 – 4 раза по отношению к псевдовероятностному.

7. Реализован программный комплекс, выполняющий прием и передачу данных, представленных в виде вероятностных отображений, с применением быстрого вероятностного представления на основе UDP протокола стека TCP/IP без ограничений на длину сообщения.

8. Выполнен вариантный анализ для быстрого вероятностного восстановления, по результатам которого можно судить о сопоставимости с LDPC-кодом, а по отношению к коду Рида-Соломона, Хэмминга, БЧХ данный показатель лучше на 14 – 78%. Также, проанализировав другие методы, можно сделать вывод, что метод помехоустойчивого кодирования быстрое вероятностное восстановление представляет собой эффективную альтернативу существующим подходам, сочетающую высокую помехоустойчивость, скорость восстановления и минимальные аппаратные затраты.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКИ.

Данная глава посвящена разработанным комплексам программ на основе полученных математических моделей, реализующих эффективные вычислительные методы, для выполнения их тестирования и оценки качества полученных результатов.

Для чего будет рассмотрена система принятия решения на базе разработанного полимодельного комплекса и описан разработанный комплекс информационной логистики на основе четырех дискретных моделей, включающих:

1. Модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока, с условием минимизации целевого показателя.
2. Модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия, с условием минимизации целевого показателя.
3. Модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика, с условием максимизации целевого показателя.
4. Модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений, с условием максимизации целевого показателя.

Для разработанной модели предложена система принятия решений, которая в перспективе может быть либо автоматической, либо автоматизированной, используемой для помощи в экспертном принятии решений.

Также будет рассмотрен программный комплекс для исследования характеристик быстрого вероятностного преобразования и выполнен анализ полученных данных. На основе полученных данных будут сформированы выводы об актуальности полученного эффективного вычислительного метода для быстрого вероятностного преобразования.

4.1. Система поддержки принятия решений ЛПР на основе полимодельного комплекса

В области принятия решений существуют классические модели и схемы на основе критериев Бартлетта, Лапласа и других. Общая типовая схема принятия решений состоит в использовании оценочной матрицы, построенной на элементах декартового произведения неопределённых внешних требований (κ , σ , μ , ρ) и вариантами альтернативных решений (С, Р, Т, К). Общий вид оценочной матрицы, представленный в Табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Общий вид структуры оценочной матрицы

«С, Р, Т, К»	κ , поступления			σ , интенсивность возмущений			μ , интенсивность использования			ρ , уровень реактивности		
	κ_1	κ_2	κ_3	σ_1	σ_2	σ_3	μ_1	μ_2	μ_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3
«С ₁ , Р ₁ , Т ₁ , К ₁ »	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
«С ₂ , Р ₂ , Т ₂ , К ₂ »	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃
...	...			...			...			...		
«С _n , Р _n , Т _n , К _n »	X _{n1}	X _{n2}	X _{n3}	X _{n1}	X _{n2}	X _{n3}	X _{n1}	X _{n2}	X _{n3}	X _{n1}	X _{n2}	X _{n3}

В таблице 4.1 для конкретизации в качестве неизвестных характеристик внешних воздействий использованы три уровня показателей интенсивности (κ) поступления исходных требований к сетевой инфраструктуре СИЛ, интенсивности (σ) несанкционированных возмущений, интенсивности (μ) использования каналов информационного обмена в данный операционный период времени, требуемый уровень реактивности (ρ) - показатель времени доступа к сетевой инфраструктуре СИЛ.

Как известно, наибольшую сложность при реализации конкретных СППР представляет собой нахождение элементов оценочной матрицы. В предлагаемом варианте эта проблема разрешается естественным способом на основе решений, полученных с использованием полимодального комплекса.

Эти решения позволяют найти значения частных критериев и сформировать картежи альтернативных вариантов реализации каналов связи СИЛ: «С, Р, Т, К».

Применение известных классических критериев часто приводит к тому, что различные критерии плохо согласуются. Это не позволяет в достаточной степени ЛПР оценить все риски от последствий принимаемых решений и тем самым обосновать использование тех или иных вариантов реализации каналов связи. Для того чтобы поддержать процесс принятия решений экспертом, далее предлагается геометрическая интерпретация схемы принятия решений и сравнение вариантов систем. При этом возможны две принципиально различные ситуации:

- множество опорных решений содержит абсолютно сравнимые варианты каналов связи по всем критериям;
- в опорное множество входят несравнимые варианты каналов связи.

С использованием геометрической интерпретации рассматриваются проекции четырехмерного критериального пространства на двумерную декартову плоскость СРТКО с взаимно перпендикулярными осями (рис. 4.1), 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 референсных показателей:

$$K' = 1 - K; \quad (4.1)$$

$$P' = 1 - P. \quad (4.2)$$

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 получим единичный квадрат, где все возможные решения будут отображаться точками, лежащими внутри этого квадрата. Точки этого квадрата образуют множество D_a . Внутренние

квадраты, содержащиеся последовательно один в другом, соответствуют множествам D_s , D_e , D_{opt} .

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

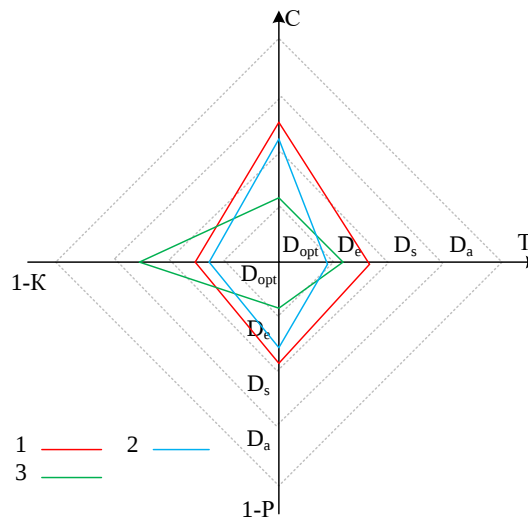


Рисунок 4.1 – Геометрическая интерпретация областей D_a , D_s , D_e , D_{opt}

принятия решений по выбору варианта реализации каналов связи, где: вариант 2 предпочтительнее варианта 1, но вариант 3 предпочтительнее варианта 2 по одному признаку и менее предпочтительно по другому признаку

На рисунке 4.1 точки "1" и "2" соответствуют полностью сравнимым вариантам систем, причём система "2" имеет неоспоримое преимущество, так как точки, ей соответствующие, менее удалены от начала координат в обоих оценочных квадрантах. В то же время системы "2" и "3" несравнимы, и эти варианты должны входить во множество парето-эффективных решений, требующих дальнейшего экспертного анализа.

Аналогичные задачи можно сформулировать для САПР сетей передач информации.

4.2. Комплекс методик декомпозиции структурно-сложных систем

Проводя научные исследования в вопросах декомпозиционного аппарата, имеется разрозненная информация по декомпозиции топологии структурно-сложных систем. Результатом выполненной работы является сведение декомпозиционных методик в единый комплекс методик декомпозиции, позволяющий проводить полную и/или неполную декомпозицию структурно-сложных систем различного назначения для аналитического автоматизированного вычисления показателей их надежности, работоспособности и степени реализации решения организационных и планирующих задач.

Выделим некоторые термины и понятия, применяемые в заявленных методиках декомпозиции.

Под системой будем понимать совокупность взаимосвязанных элементов некоторого системного объекта или организационного (планирующего) процесса, предназначенного для выполнения определенных функций или направленного для решения поставленных задач.

Отдельные части системы (конструктивно обособленные) называются элементами. Одну и ту же систему в зависимости от задачи возможно рассматривать как систему или элемент более крупной системы. Следовательно, к одной и той же рассматриваемой системе применимо несколько принципов декомпозиции ее структуры.

Элемент — это объект, представляющий собой простейшую часть системы, отдельные части которой не представляют самостоятельного интереса в рамках конкретного рассмотрения.

Наиболее известными способами графического моделирования структурно-сложных систем являются последовательно-параллельные схемы,

блок-схемы, графы связности, деревья событий или деревья отказов, марковские графы состояний и переходов, схемы функциональной целостности.

Общий логико-вероятностный метод послужил прототипом построения логической функции работоспособности системы (далее ЛФРС) на основании логического критерия функционирования (далее ЛКФ).

Под ЛФРС будем понимать точное и однозначное аналитическое представление состояний системы, в которых она реализует свое заданное функциональное назначение.

Настоящий стандарт, схемы функциональной целостности, деревья событий, деревья отказов подразумевают декомпозицию рассматриваемой структуры системы на функциональные элементы (где коммуникационные связи рассматриваются в составе функциональных элементов или как связующие их логические условия).

Методики декомпозиции систем различных видов, классов и назначений включают в себя:

- методику полной декомпозиции структуры системы;
- методики неполной декомпозиции структуры системы.

Методика полной декомпозиции подразумевает разделение структуры рассматриваемой системы на отдельно представляемые части:

- функциональные элементы, где каждый элемент имеет свой показатель надежности для изолированных технических систем, показатель живучести для открытых технических систем или показатель устойчивости для организационных систем;
- коммуникационные связи, где каждая связь имеет свой показатель надежности, живучести и где состояния переходов коммуникационных связей представлены как полная группа несовместных событий.

Под устойчивостью будем понимать способность структурного подразделения сохранить способность гарантированного выполнения полученной задачи.

Методики неполной декомпозиции подразумевают разделение структуры системы по трем принципам:

Первый принцип:

– функциональные элементы, где каждый элемент имеет свой показатель надежности для изолированных технических систем, показатель живучести для открытых технических систем или показатель устойчивости для организационных систем;

– коммуникационные связи, где состояния переходов связей представлены как полная группа несовместных событий.

Второй принцип – коммуникационные связи, где каждая связь имеет свой показатель надежности, живучести и состояния переходов связей, представлены как полная группа несовместных событий.

Третий принцип – коммуникационные связи, где состояния переходов связей представлены как полная группа несовместных событий.

Рассмотрим структурно-сложную систему, представленную в форме графовой структуры – комбинации вершин (функциональных узлов) и ребер. Узлы графа описывают все возможные состояния компонентов системы и их соответствующие детерминированные характеристики, ребра – связи компонентов между собой, граф взвешенный ориентированный.

Разберем методику полной декомпозиции топологии структурно-сложной системы.

Для вычисления показателя надежности, живучести структурно-сложных систем по формуле полной вероятности аналитическим способом на основе ориентированного взвешенного графа существует, и применяются только традиционные (неавтоматизированные, ручные) методики моделирования и вычисления.

С усложнением топологии ориентированного взвешенного графа в традиционной методике по вычислению аналитического показателя надежности, живучести структурно-сложных систем по формуле полной вероятности проявляются следующие недостатки:

- теряется наглядность и прозрачность вычисления;
- время на анализ структуры графа, анализ причинно-следственных связей, построение вероятностной функции увеличивается;
- уменьшается точность аналитического вычисления;
- снижается эффективность вычисления при необходимости внести изменения в графическую модель;
- отсутствует вариативность в моделировании и при проведении вычисления;
- возникают сложности с проведением верификации.

Рассмотрим техническую систему (далее ТС), которая представляется в виде ориентированного взвешенного графа, веса на ребрах и количественные показатели узлов детерминированы, заданные вероятности являются не чем иным, как численными мерами степени объективной возможности данных частных показателей.

Функционированием элемента технической системы называется событие, которое в результате опыта должно произойти с вероятностью согласно (4.3):

$$0 < P(A) \leq 1. \quad (4.3)$$

Таким образом, при рассмотрении функционирования единичного узла, коммуникационной связи, не равной нулю, считаем, что данный элемент структуры системы работоспособен с детерминированным или вычисленным показателем надежности для периода нормальной эксплуатации элементов, когда можно принять интенсивность отказов $\lambda(t) = \lambda = const$ по формуле (4.4):

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (4.4)$$

Невозможным называется событие V , которое в результате опыта не может произойти. Для системы детерминированный показатель, равный (4.5), означает, что данный элемент структуры неисправен и не функционирует.

$$P(V) = 0. \quad (4.5)$$

Критерии исходящих весов рёбер из узла образуют полную группу несовместных событий (4.6) и равны единице, таким образом, для промежуточного элемента ТС, входящего в ЛФРС, должна быть определена одна или несколько коммуникационных связей, и в результате опыта непременно должна произойти хотя бы одна из них:

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_k) = 1. \quad (4.6)$$

Под сложным событием будем понимать некое подмножество множества элементарных событий. Сложное событие в результате испытания наступает тогда и только тогда, когда в результате испытаний произошло элементарное событие, принадлежащее сложному. Случай является благоприятным событием, если его появление влечет за собой последующие события.

Между случайными событиями и множествами существует связь, так, совокупность элементарных событий возможно назвать множеством (пространством) элементарных исходов, и, соответственно, пространство элементарных исходов рассматривается как универсальное множество по отношению к случайным событиям. Любое случайное событие A состоит из одного и более элементарных исходов. Если элементарный исход обозначить через ω , тогда случайное событие A можно рассматривать как подмножество пространства Ω (4.7):

$$A = \{\omega \in \Omega \mid \omega \in A\}. \quad (4.7)$$

Вероятность произведения нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляется при условии, что все предыдущие имели место (4.8):

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_k) = P(A_1) \cdot P(A_2/A_1) \cdot P(A_3/A_1 A_2) \dots P(A_k/A_1 A_2 \dots A_{k-1}). \quad (4.8)$$

При последовательном соединении элементов вероятность безотказной работы системы за время t при известных вероятностях безотказной работы определена:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{k=1}^n P_k(t), \quad (4.9)$$

где $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ – показатели вероятности безотказной работы 1, 2, 3, ..., n -го элементов системы за время t .

Событие A может наступить при условии одного из несовместных событий $H_1, H_2, \dots, H_n$, образующих полную группу событий, называемых гипотезами. Пусть известны вероятности гипотез: $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$ и условные вероятности: $P(A/H_1), P(A/H_2), \dots, P(A/H_n)$. Вероятность события A , которое может наступить лишь при условии появления одного из несовместных событий $H_1, H_2, \dots, H_n$, образующих полную группу, равна сумме произведений вероятностей каждого из этих событий на соответствующую условную вероятность события A (4.10).

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A \cdot H_i) = \sum_{i=1}^n P(H_i) P(A/H_i). \quad (4.10)$$

Проанализировав представленную методику, становится очевидным утверждение, что оптимизация и автоматизация данного процесса повысит эффективность оценки показателя функционирования дискретной технической системы путем декомпозиции её структуры.

Содержание оптимизации методики состоит в применении графоаналитической методики моделирования при представлении задачи в графическом виде на основе ориентированного взвешенного графа.

Содержание автоматизации методики состоит в минимизации действий исследователя в вычислительном процессе и выдачи обоснованных аналитических рекомендаций в принятии решений по выбору эффективной стратегии решений при проведении количественной оценки показателя надежности структурно-сложной системы.

4.3. Комплекс программ оптимизации сетевой инфраструктуры СИЛ

В рамках работы была разработана программа, осуществляющая решение задач для модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач, включающих в себя [105]:

1. С-модель – модель поиска экстремума стоимостных показателей информационного потока, с условием минимизации целевого показателя;
2. Т-модель – модель поиска экстремума временных потерь, обеспечения информационного взаимодействия, с условием минимизации целевого показателя;
3. Р-модель – модель поиска экстремума надежности при решении задач обеспечения сетевого трафика, с условием максимизации целевого показателя;
4. К-модель – модель поиска экстремума показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений, с условием максимизации целевого показателя.

На рисунке 4.2 приведено главное окно программы.

Рисунок 4.2 – Основное окно программного комплекса построения моделей дискретной оптимизации

Окно программы можно условно разделить на 3 части:

- область параметров модели;
- область результата;
- функциональный блок.

Область параметров модели отображает основные параметры, такие как:

- M – количество узлов источников;
- N – количество доступных каналов передачи информации;
- O – количество узлов приемников;
- L – количество доступных средств помехоустойчивого кодирования;

– $I(rshu) - I_{rshu}$ – объём передачи данных от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала за операционную единицу времени с использованием кода типа u ;

– $t(rshu) - t_{tshu}$ – время передачи данных от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

- $C(rshu) - C_{rshu}$ – стоимость передачи единицы объема данных от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;
- $@i(rshu) - \lambda i_{rshu}$ – интенсивность отказов (сбоев) при подготовке информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;
- $@c(rshu) - \lambda c_{rshu}$ – интенсивность отказов (сбоев) в канале при передаче информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;
- $@g(rshu) - \lambda g_{rshu}$ – интенсивность отказов (сбоев) при приеме информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -ого канала с использованием кода u ;
- $KI(rshu)$ – помехоустойчивость источника информации;
- $KC(rshu)$ – помехоустойчивость канала связи;
- $KG(rshu)$ – помехоустойчивость приемника информации.

В область результата осуществляется вывод рассчитанных C , P , T , Q согласно введенным данным и выбранной модели оптимизации.

Функциональный блок можно разделить на две части, первая отвечает за варианты расчета, она позволяет выбрать модель оптимизации, заполнить модельные данные случайным набором данных, выполнить расчёт по случайно выбранной модели либо расчет на основании изменений массива модельных решений. Вторая часть – это функционал работы с внесением и сохранением данных, он позволяет осуществить запись в файл, чтение из файла, очистку поля результата и выход из программы.

Разработанное приложение написано в среде Visual Studio и содержит следующие основные файлы:

Form1.Designer.cs – файл, описывающий элементы управления окна приложения, ввода, вывода данных.

Form1.cs – файл с описанием работы дискретных моделей оптимизации.

Остальные файлы являются стандартными и не были модифицированы в ходе разработки.

Основные используемые переменные:

Irshu – матрица объёма передачи данных $I[r, s, h, u]$;

trshu – время передачи данных $t[r, s, h, u]$;

Crshu – стоимость передачи единицы объёма данных $C[r, s, h, u]$;

irshu – интенсивность отказов источника $@i(rshu)$;

crshu – интенсивность отказов канала $@c(rshu)$;

grshu – интенсивность отказов приемника $@g(rshu)$;

Kirshu – помехоустойчивость источника информации $KI(rshu)$;

Kcrshu – помехоустойчивость канала связи $KC(rshu)$;

Kgrshu – помехоустойчивость приемника информации $KG(rshu)$;

KSUM – суммарная помехоустойчивость системы;

Pirshu – вероятности безотказной работы для источника – $[[pi]]_{rshu}(t)$;

Pcrshu – вероятности безотказной работы для канала связи – $[[pc]]_{rshu}(t)$;

Pgrshu – вероятности безотказной работы для приемника – $[[pg]]_{rshu}(t)$;

Prshu – суммарный показатель надежности – $p_{rstu}(t)$;

P2rshu – общая вероятность безотказной работы системы;

Mainrshu – суммарная интенсивность отказов $Mainrshu[r, s, h, u]$;

Xrshu – матрица модельных решений $X[r, s, h, u]$;

Рассчитаем для некоторого набора входных значений параметры оптимизационных моделей, результат расчетов приведен на рисунке 4.3:

Построение моделей дискретной оптимизации

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

C = 16
 T = 23
 P = 20,50
 Q = 21,82

 C = 17
 T = 19
 P = 23,66
 Q = 27,39

 C = 25
 T = 21
 P = 38,17
 Q = 29,22

 C = 44
 T = 56
 P = 27,45
 Q = 46,00

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

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

Рисунок 4.3 – Оптимизация некоторой системы по заданным критериям

Полученные данные по значениям С-модели, Т-модели, Р-модели, К-модели сведены в Табл. 2.

Таблица 4.2 – 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

Для графической интерпретации выполним нормирование параметров в единичном диапазоне и для Р и К возьмем обратные значения.

Таблица 4.3 – Нормированные значения моделей оптимизации

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

Выполним графическую интерпретацию (рисунок 4.4) полученных значений, для обозначения С, Р, Т, К-моделей соответственно используем точки 1, 2, 3, 4.

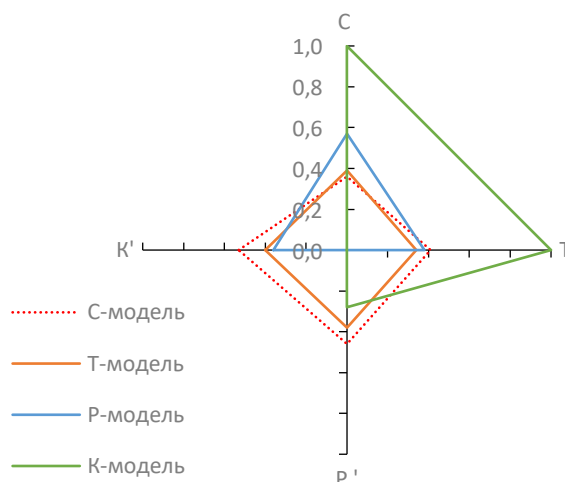


Рисунок 4.4 – Геометрическая интерпретация оптимизации системы по заданным моделям

Анализируя полученные значения, необходимо отметить, что полученные значения в данном наборе хоть и не являются сравнимыми с точки зрения параметров оптимизации, однако показывают легкость выявления неоптимальных решений 4 – К-модели по причине выхода на границы рассматриваемых областей, при этом данные С-модели, 2 – Т-модели, 3 – Р-модели находятся в областях, допустимых и удовлетворительных в первом квадранте, и в областях, допустимых, удовлетворительных и эффективных в третьем квадранте.

В настоящее время системы контроля сетевых инфраструктур СИЛ представляют собой важнейшее средство анализа состояния системы критически важных объектов. В связи с этим возникает объективная потребность разработки методов и средств, предназначенных для реализации системы непрерывного мониторинга сетевых инфраструктур СИЛ и прогнозирования возникновения аномальных состояний.

Процедура многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена предполагает определенный порядок синтеза:

- первоначально определяется синтез каналов информационного обмена для подсети;
- затем для сформированного решения по синтезу подсети определяется решение по синтезу узла сети.

Следует отметить, что для каждого узла сети формируются матрицы модельных решений $X_{i,g}$ (1.5).

В разделе 2 для построения матриц модельных решений $X_{i,g}$ были получены следующие модели:

- минимизации стоимостных показателей информационного трафика С-модель;
- минимизации временных затрат для информационного обмена Т-модель;
- максимизации функций надежности сетевого трафика Р-модель;
- максимизации показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений К-модель.

Для понимания механизмов многоуровневой оптимизации рассмотрим простейший пример двухуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена, для которой:

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

I-й уровень оптимизации.

Сложность при реализации конкретных СППР представляет собой нахождение элементов оценочных матриц.

В предлагаемом автором варианте эта проблема разрешается естественным способом на основе решений, полученных с использованием

построенного ранее полимодального комплекса. Эти решения позволяют найти значения частных критериев и сформировать картежи альтернативных вариантов реализации структурного синтеза каналов информационного обмена: «С, 1-Р, Т, 1-К».

Для использования геометрической интерпретации рассматриваются проекции четырехмерного критериального пространства на двумерную декартову плоскость СРТКО с взаимно перпендикулярными осями (рис. 4.5).

Как видно из рис. 4.5, необходимо рассматривать разность площадей четырёхугольников 1 и 2 и решать задачу на минимизацию данной разности. Причём все четырёхугольники меньшей площади, чем 1, являются более эффективными при альтернативных вариантах реализации структурного синтеза каналов информационного обмена. В первую очередь следует рассматривать «равномерные» решения по критериям, когда каждый критерий находится внутри базового четырёхугольника 2 (см. рисунок 4.6).

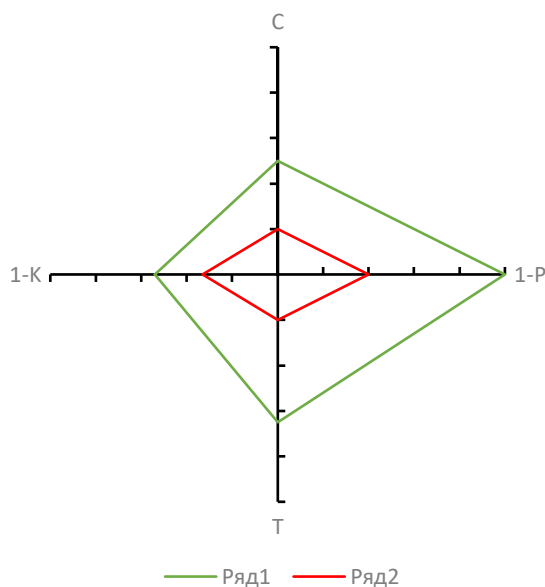


Рисунок 4.5 – Геометрическая интерпретация проекции четырехмерного критериального пространства.

2 – минимально возможные значения критериев;

1 – текущее значение критериев до оптимизации.

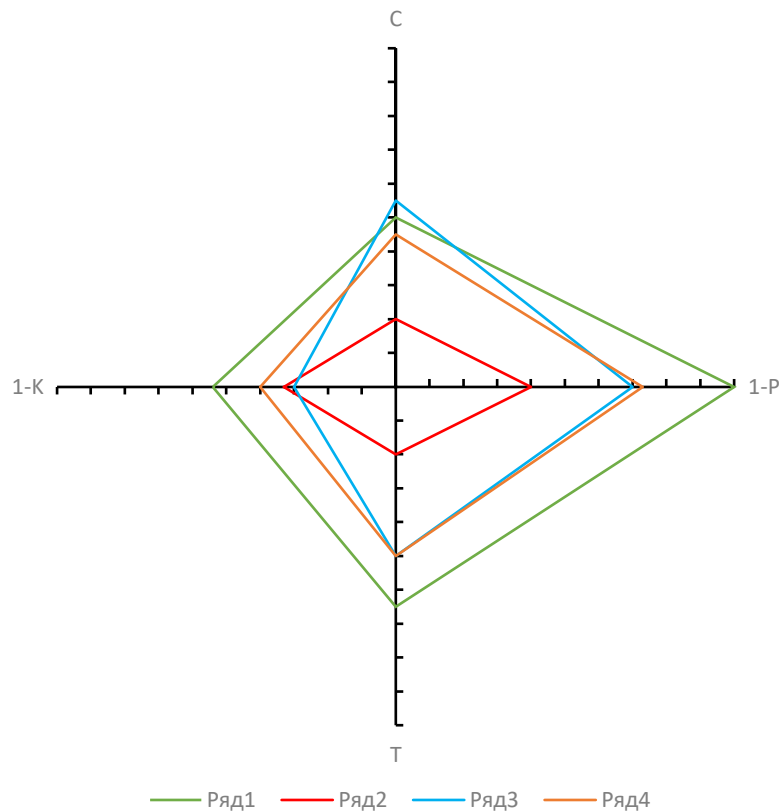


Рисунок. 4.6 – Геометрическая интерпретация проекции четырехмерного критериального пространства, на I-м уровне оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена.

1 – текущее значение критериев до оптимизации;

2 – минимально возможные значения критериев;

3 – вариант оптимизации 1;

4 – вариант оптимизации 2;

Как следует из рис. 4.6, четырёхугольники, соответствующие решениям 3 и 4, имеют равную площадь, однако решение 4 является предпочтительнее, т.к. каждый его критерий находится внутри базового четырёхугольника 2.

Применение известных классических критериев часто приводит к тому, что различные критерии плохо согласуются, что не позволяет в достаточной степени ЛПР оценить все риски от последствия принимаемых решений и тем самым обосновать использование тех или иных вариантов реализации структурного синтеза каналов информационного обмена. Для того чтобы поддержать процесс принятия решений, экспертом предлагается

геометрическая интерпретация схемы принятия решений и сравнения вариантов систем.

Рассмотрим пример оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена, используя модель минимизации стоимостных показателей каналов информационного обмена (С-модель).

Для этого на втором уровне оптимизации выполним минимизацию стоимости передачи данных C путем выбора таких элементов четырехмерной матрицы HC, TP, K при выполнении ограничений на время передачи информации, вероятность безотказной работы, уровень помехоустойчивости и выполнения условия (4.11)

$$\begin{aligned}
 C &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} c_{rshu} \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\
 &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cg_{rshu} + cc_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot h_{rshu} \quad (4.11) \\
 &\rightarrow \min.
 \end{aligned}$$

при ограничениях:

$$\left\{ \begin{aligned}
 T &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tg_{rshu} + tc_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} < T_0 \\
 P &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda g_{rshu} - \lambda c_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot h_{rshu}] > P_0 \\
 K &= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KGL_{rshu} + KCL_{rshu}) \cdot h_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\
 &\left(\sum_{r \in R} \left| \sum_{s \in S} \left| \sum_{h \in H} \left| \sum_{u \in U} h_{rshu} \right. \right. \right. \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1
 \end{aligned} \right. \quad (4.12)$$

Основные переменные, образующие исходный факторный базис:

W_{rshu} – объём передачи данных от i -ого источника к k -му приемнику посредством j -го канала за операционную единицу времени с использованием шифра типа l ;

V_{rshu} – скорость передачи данных от i -ого источника к k -му приемнику посредством j -го канала с использованием шифра l ;

t_{rshu} – время передачи данных от i -ого источника к k -му приемнику посредством j -го канала с использованием шифра l ;

C_{rshu} – стоимость передачи единицы объема данных от i -ого источника к k -му приемнику посредством j -го канала с использованием шифра l ;

λs_{rshu} – интенсивность отказов (сбоев) при подготовке информации от i -ого источника к k -му приемнику посредством j -го канала с использованием шифра l ;

λk_{rshu} – интенсивность отказов (сбоев) в канале при передаче информации от i -ого источника к k -му приемнику посредством j -го канала с использованием шифра l ;

λf_{rshu} – интенсивность отказов (сбоев) при приеме информации от i -ого источника к k -му приемнику посредством j -го канала с использованием шифра l ;

h_{rshu} – первоначально неизвестные величины, подлежащие определению в результате решения комплекса оптимизационных задач.

Элементы матрицы НС,Т,Р,К являются булевскими величинами, т.е. $x_{rshu} \in B$, где B – множество булевых чисел, которые равны единице, если выбрано для реализации допустимое ребро в двудольном графе Y рассматриваемой задачи, и равны нулю в противном случае.

В таком случае решение этой задачи, если оно существует, позволяет найти план использования заданной сети каналов узла подсети с таким назначением каналов передачи информации между всеми источниками и приемниками, который минимизирует стоимость телекоммуникации при обеспечении требуемого уровня отказоустойчивости, помехоустойчивости, а также времени передачи.

Аналогично С-модели находятся решения для 1-Р, Т, 1-К-моделей.

II-й уровень оптимизации.

В рассматриваемой авторами задаче синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств для систем контроля окружающей среды выделяются следующие виды ресурсов:

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

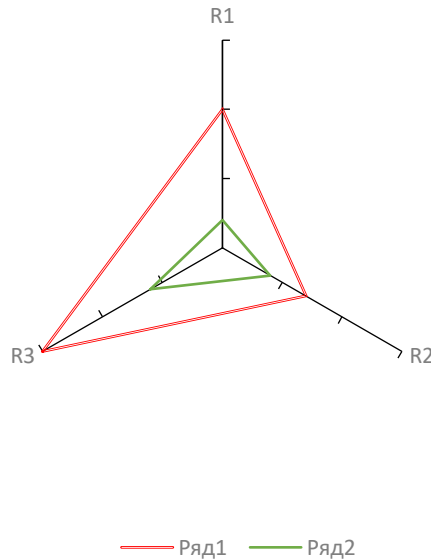


Рисунок 4.7 – Геометрическая интерпретация проекции трёхмерного критериального пространства, на II-м уровне оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена

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. 4.7).

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 рисунке 4.8 представлена блок-схема двухуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств для систем контроля окружающей среды.

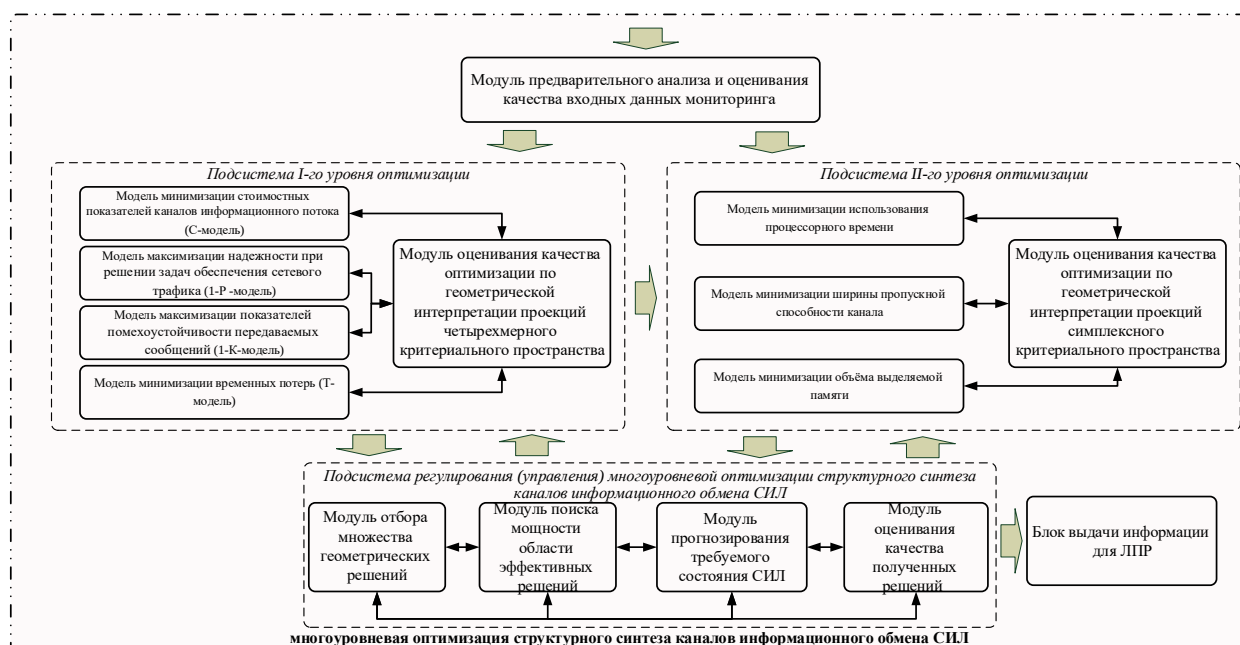


Рисунок 4.8 – Обобщенная структурно-функциональная схема многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств

В состав предложенной схемы входят:

- модуль предварительного анализа и оценивания качества входных данных, предназначенный для контроля корректности поступающих на вход системы данных;
- подсистема первого уровня оптимизации, содержащая:
 - модель минимизации стоимостных показателей каналов информационного обмена (С-модель);
 - модель минимизации вероятности отказа при обеспечении информационного объема (1-Р-модель);
 - модель минимизации уязвимости передаваемых сообщений (1-К-модель);
 - модель минимизации временных потерь (Т-модель), связанных с обеспечением информационного обмена;
- модуль оценивания качества оптимизации по геометрической интерпретации проекций четырехмерного критериального пространства, предназначенный для оптимизации по значениям частных критериев и

формирования картежей альтернативных вариантов реализации структурного синтеза каналов информационного обмена для систем контроля окружающей среды;

- подсистема второго уровня оптимизации, содержащая:
- модель минимизации использования процессорного времени;
- модель минимизации ширины пропускной способности канала;
- модель минимизации объёма выделяемой памяти;
- модуль оценивания качества оптимизации по геометрической интерпретации проекций симплексного критериального пространства;
- подсистему регулирования (управления) многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств, содержащую:
 - модуль отбора множества геометрических решений;
 - модуль поиска мощности области эффективных решений;
 - модуль прогнозирования требуемого состояния КИО;
 - модуль оценивания качества полученных решений;
 - блок выдачи информации для ЛПР.

Таким образом, можно выделить следующие преимущества многоуровневой оптимизации над одноуровневой:

- большая гибкость;
- большие функциональные возможности;
- уменьшение вычислительной сложности;
- перспективность для сетей (задач) большей размерности, например сетей 5G.

4.4. Программный комплекс для исследования характеристик быстрого вероятностного восстановления

В качестве языка программирования был выбран язык программирования C++, исходя из его универсальности, повсеместного

применения и кросс-платформенности. Для создания оконного приложения использовалась библиотека MFC, а для передачи данных использовался протокол UDP.

Разработанный программный продукт состоит из 8 заголовочных файлов, 7 исходных файлов, а также 3 файлов ресурса диалогового окна [110].

Описание файлов заголовков:

1. **stdafx.h** – подключает библиотеки MFC и макросы для корректной работы программы на ОС Windows.

2. **Resource.h** – файл для замещения всех идентификаторов элементов, находящихся в диалоговых окнах (формах) программы, на последовательность символов при обнаружении их в тексте программы.

3. **Sock.h** – класс сокетов, производных от класса асинхронных сокетов CAsyncSocket. Этот класс инкапсулирует API сокетов Windows, представляя объектно-ориентированную абстракцию для использования Windows сокетов в сочетании с MFC. Обеспечивает гибкость программирования непосредственно в API-интерфейсе сокетов, но также для удобного использования функций обратного вызова и уведомления о сетевых событиях.

4. **PRNG.h** – класс для кодирования/декодирования данных. Предназначен для представления данных в вероятностной форме на стороне отправителя, а также восстановления этих данных на стороне приемника.

5. **Head.h** – заголовочный main-файл проекта. Класс CHeadApp, производный от класса CWinApp. Этот класс предназначен для создания диалогового окна проекта.

6. **HeadDlg.h** – заголовочный файл проекта, производный от класса CDialog. Содержит в себе объявление переменных, методов и обработчиков событий для элементов диалогового окна.

7. **CTestDialog.h** – класс CTestDialog, производный от класса CDialogEx. Предназначен для объявления переменных, методов и обработчиков событий для элементов второго диалогового окна, где производится тестирование

метода представления данных в вероятностной форме, а также восстановления этих данных.

8. RecoveryData.h – класс `RecoveryData`, производный от класса `CDialogEx`, он предназначен для элементов третьего диалогового окна, где производится преобразование и восстановление данных с возможностью задать вероятность возникновения помехи, а также строится график восстановления (в частности, и восстановления с помехой).

Описание исходных файлов:

1. **stdafx.cpp** – исходный файл подключает `stdafx` и позволяет прекомпилировать макросы и библиотеки MFC.

2. **Sock.cpp** – описывает методы класса `Sock`, созданного в `Sock.h`. Содержит в себе такие методы, как: подключение на стороне клиента, отключение от сети, получение сообщений, запрос на подключение клиентам к серверу.

3. **PRNG.cpp** – описывает методы класса `PRNG`, созданного в `PRNG.h`. Отвечает за инициализацию псевдослучайной последовательности, кодирование (представление данных в форме вероятностного отображения) при помощи сгенерированной ПСП, восстановление данных (декодирование из вероятностной формы), сбор статистики декодирования.

4. **Head.cpp** – описывает методы класса `CHeadApp`, созданного в `CHead.h`. Создает диалоговое окно программы.

5. **HeadDlg.cpp** – описывает методы класса `CHeadDlg`, созданного в файле `HeadDlg.h`. Присвоение объектам классов элементов диалогового окна переменных для удобного обращения в тексте программы. Описывает события при нажатии на кнопки. Задает начальные значения и настройку диалогового окна, запускает сервер и подключает к нему клиентов, если совпадает IP и порт. Отключение от сервера либо остановка (выключение) сервера, а также отправка закодированных сообщений по сети.

6. **CTestDialog.cpp** – описывает методы класса `CTestDialog`, созданного в `CTestDialog.h`. Отвечает за поведение диалогового окна для тестирования

метода вероятностного кодирования. Представление данных в вероятностную форму, восстановление их, а также прорисовку графика восстановления данных.

7. **RecoveryData.cpp** – описывает методы класса RecoveryData, созданного в RecoveryData.h. Отвечает за поведение диалогового окна для преобразования и восстановления данных, вручную введенный текст или файл с кодировкой UTF - 8, с возникновением помехи и прорисовка графика восстановления.

Также были настроены 3 ресурс-файла – IDD_HEAD_DIALOG, IDD_TEST1_DIALOG и IDD_TEST2_DIALOG (рисунок 4.5, 4.6 и 4.7 соответственно). Указанные файлы представляют собой интерфейсные диалоговые окна разработанной программы.

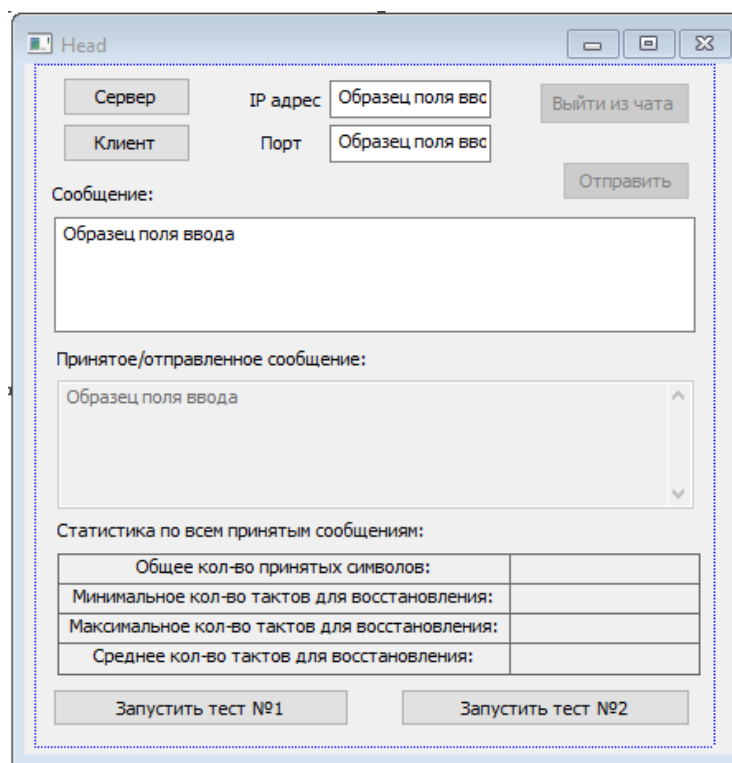


Рисунок 4.5 – Диалоговое окно IDD_HEAD_DIALOG

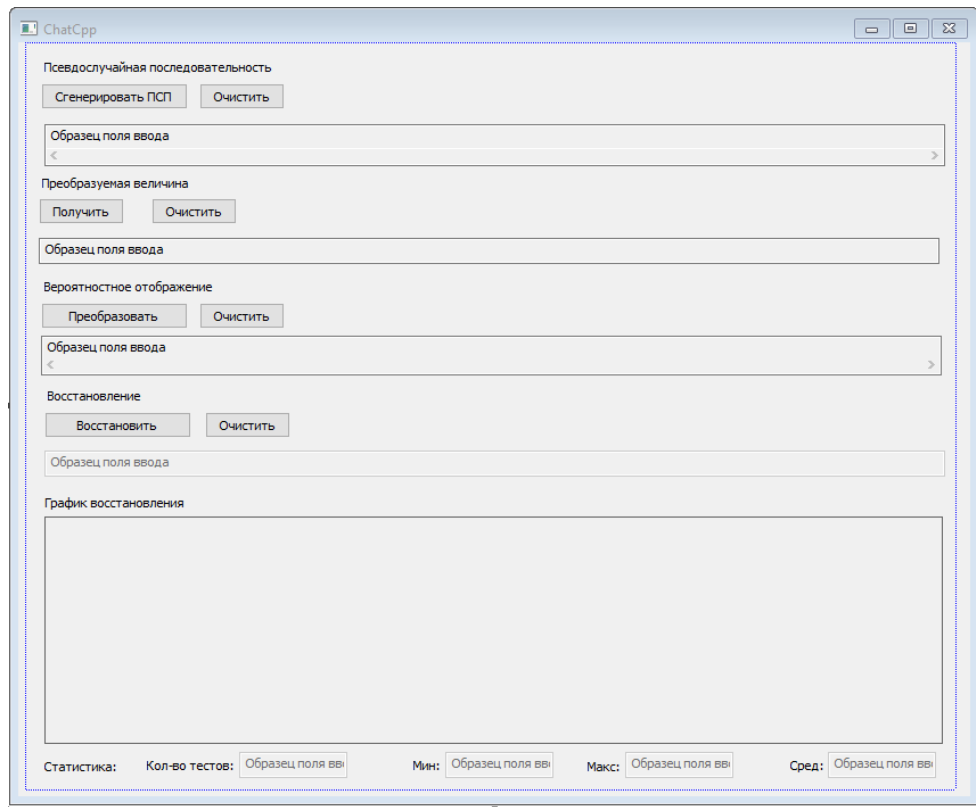


Рисунок 4.6 – Диалоговое окно IDD_TEST1_DIALOG

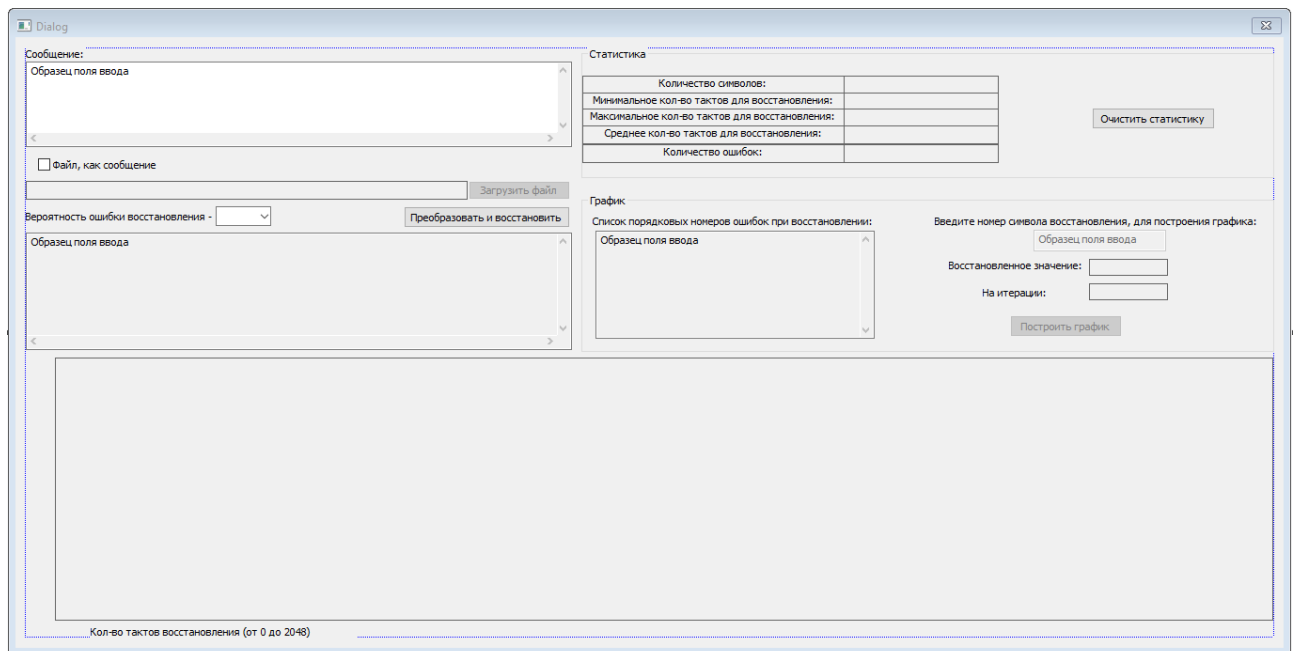


Рисунок 4.7 – Диалоговое окно IDD_TEST2_DIALOG

Используя шаблон приложения MFC, а также обширную клиентскую библиотеку с собственными элементами графического интерфейса, была

написана программа, моделирующая работу канала связи для данных, представленных в вероятностной форме.

Для тестирования необходимо запустить приложение на разных устройствах, находящихся в одной локальной сети. Начальный экран при запуске приложения показан на рисунке 4.8.

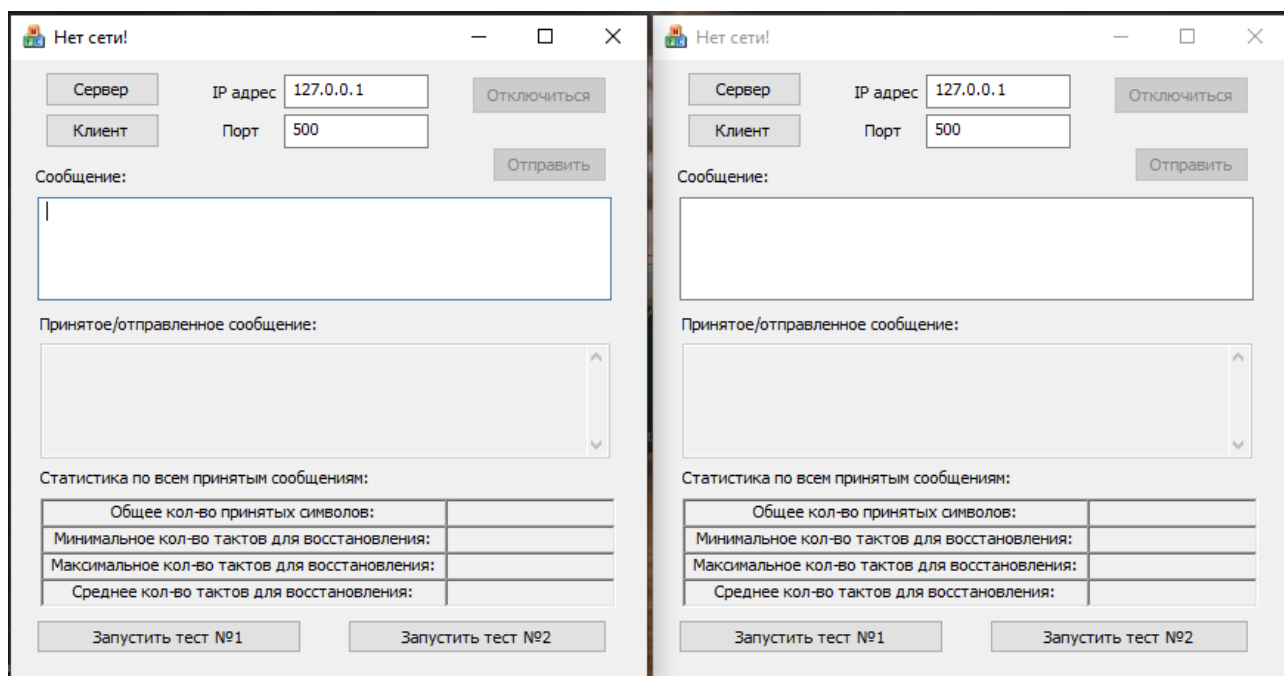


Рисунок 4.8 – Начальный экран запуска приложения

Для работы сети первоначально необходимо задать IP-адрес и порт для передачи данных, также можно использовать IP и порт по умолчанию. Далее происходит запуск сервера с заданными параметрами (рисунок 4.8).

Выполнение подключения клиентской части производится по заданным сетевым параметрам сервера. На стороне клиента необходимо внести IP адрес и порт. В случае наличия проблем с сетью и в случае ввода некорректных параметров сервера, не существующего в данной локальной сети, высветится предупреждение об ошибке (рисунок 4.9).

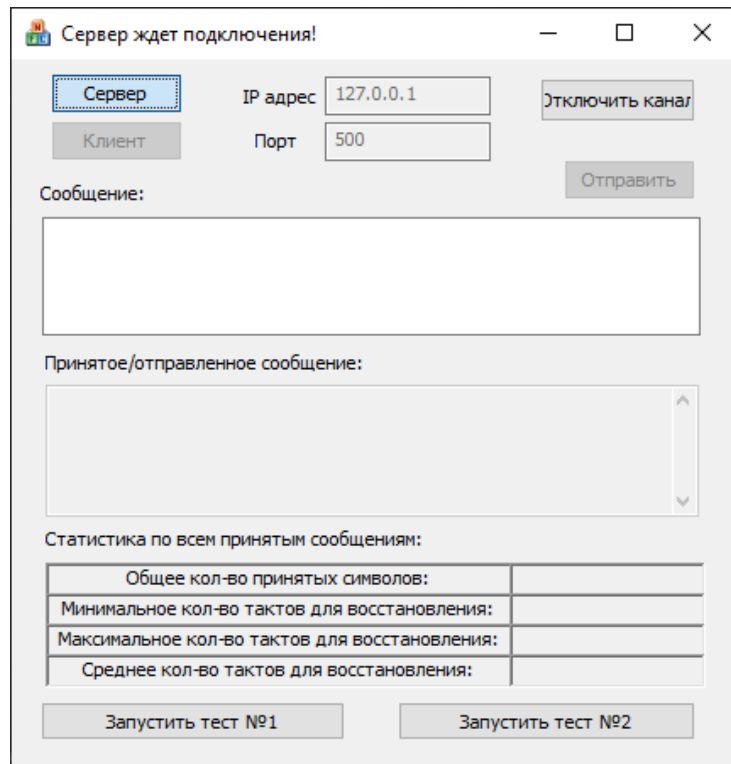


Рисунок 4.9 – Запуск сервера

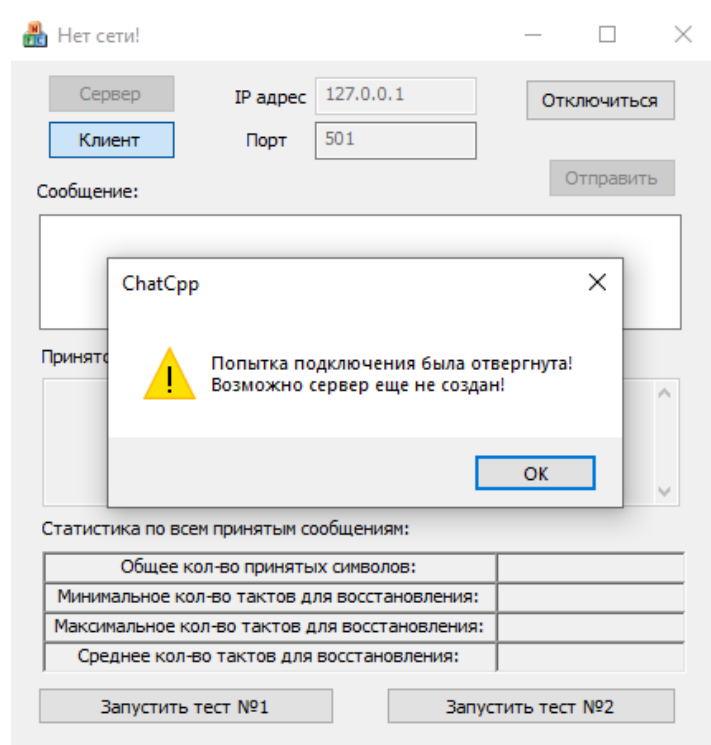


Рисунок 4.10 – Попытка подключиться к несуществующему серверу

При вводе существующих параметров сервера на клиенте и нажатии на кнопку «Клиент» подключение к серверу выполнено успешно (рисунок 4.9).

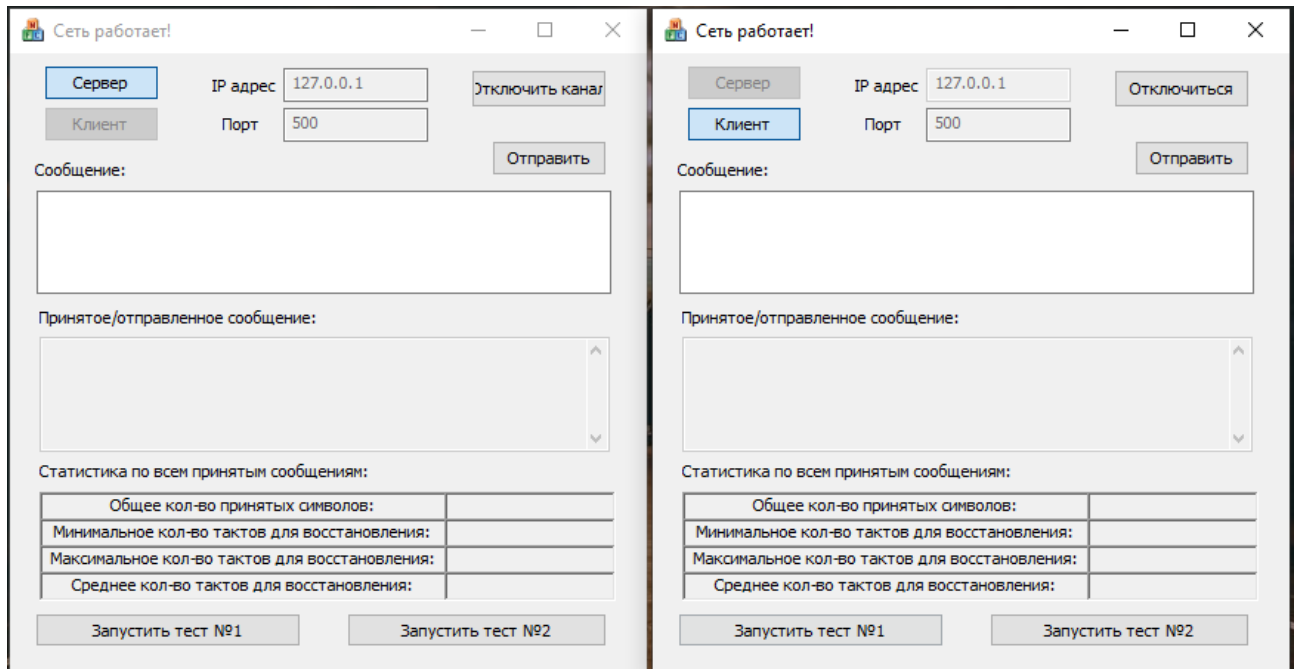


Рисунок 4.11 – Подключение клиента к серверу

В данной работе предусмотрено подключение нескольких клиентов к серверу, а также передача сообщений для всех клиентов. Сам сервер также может участвовать в передаче и приеме сообщений.

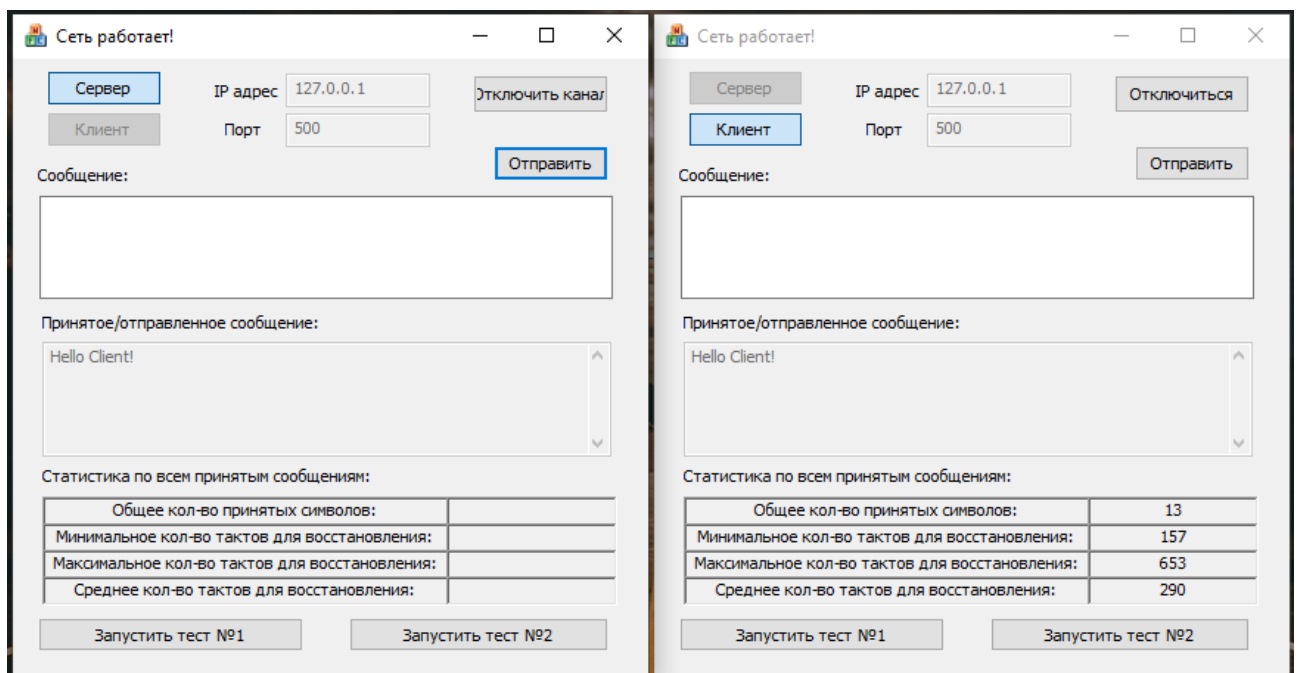


Рисунок 4.12 – Отправка сообщения в сеть

Для отправки сообщений необходимо в программе осуществить ввод сообщения в соответствующем поле. При нажатии на кнопку «Отправить» сообщение представляется в вероятностную форму и передается получателю. На стороне получателя принимается сообщение в вероятностной форме и осуществляется его обработка с выполнением быстрого восстановления данных, после выводится принятое сообщение на экран, также формируется статистика на стороне получателя сообщения (рисунок 4.12).

При нажатии на кнопку «Отключиться» клиент отключается от сервера, и ему больше не доступны функции чата, также на сервере выводится сообщение, что один из пользователей отключился, и сервер передает данное сообщение другим подключенным клиентам (рисунок 4.13).

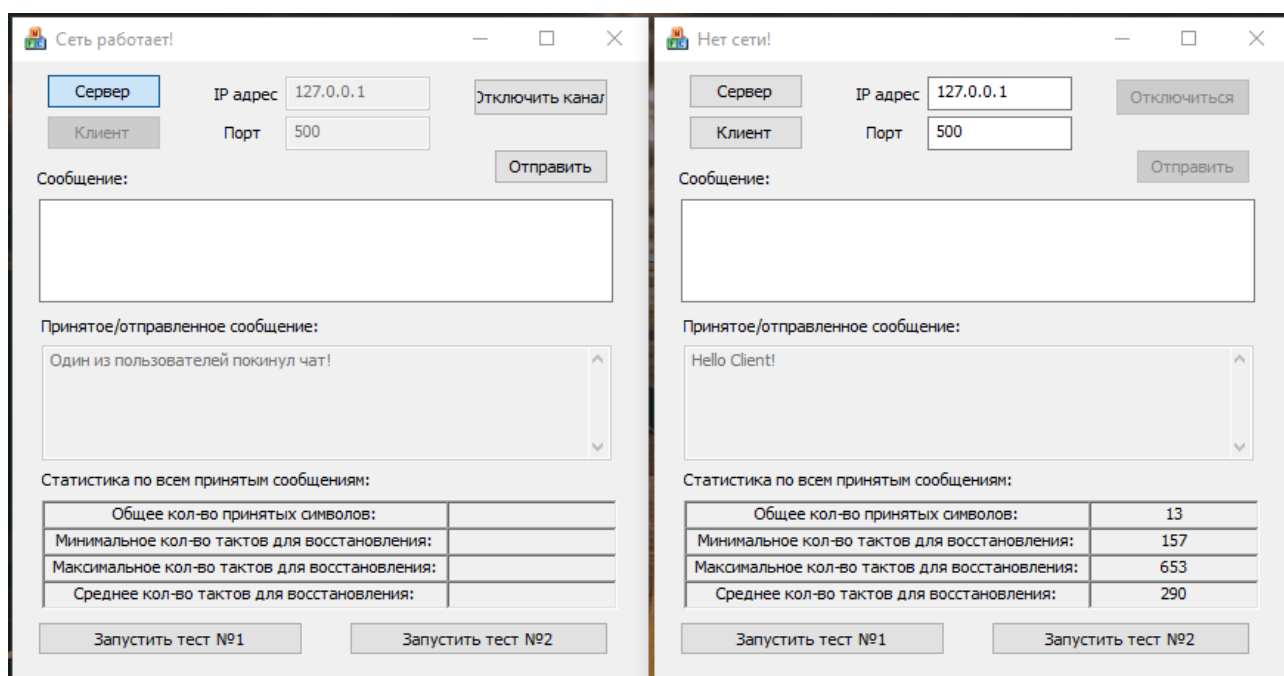


Рисунок 4.13 – Отключение клиента от чата

Чтобы отключить сервер, необходимо на самом сервере нажать кнопку «Отключить канал». После нажатия сервер отключается, и все клиенты также будут отключены от возможности передачи сообщений, представленных в вероятностной форме. У клиентов при отключении сервера будет выведено соответствующее сообщение (рисунок 4.14).

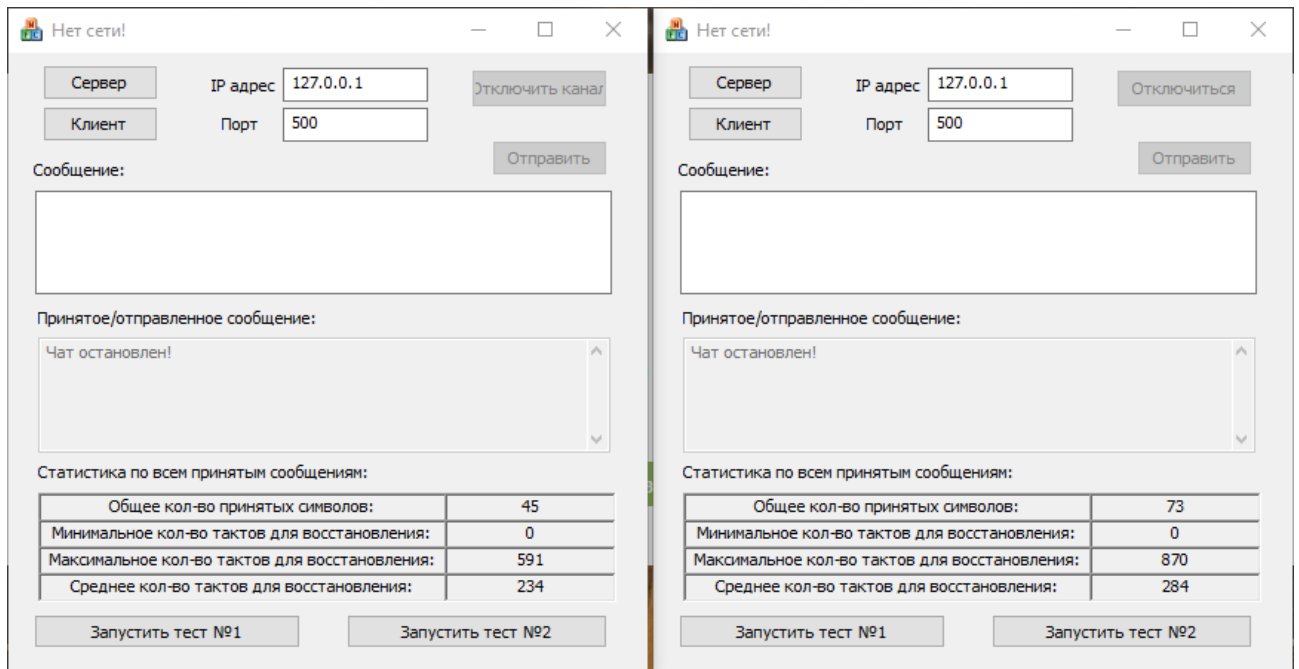


Рисунок 4.14 – Отключение/остановка сервера

Таким образом, была протестирована отправка преобразованных сообщений и восстановление их на стороне приемника. Ниже рассмотрим разработанные тесты для более подробного разбора этого метода.

Тест 1. Для наглядности метода вероятностного кодирования было разработано новое диалоговое окно, которое можно вызвать из стартового экрана чата нажатием на кнопку «Запустить тест № 1». После нажатия открывается диалоговое окно теста (рисунок 4.15).

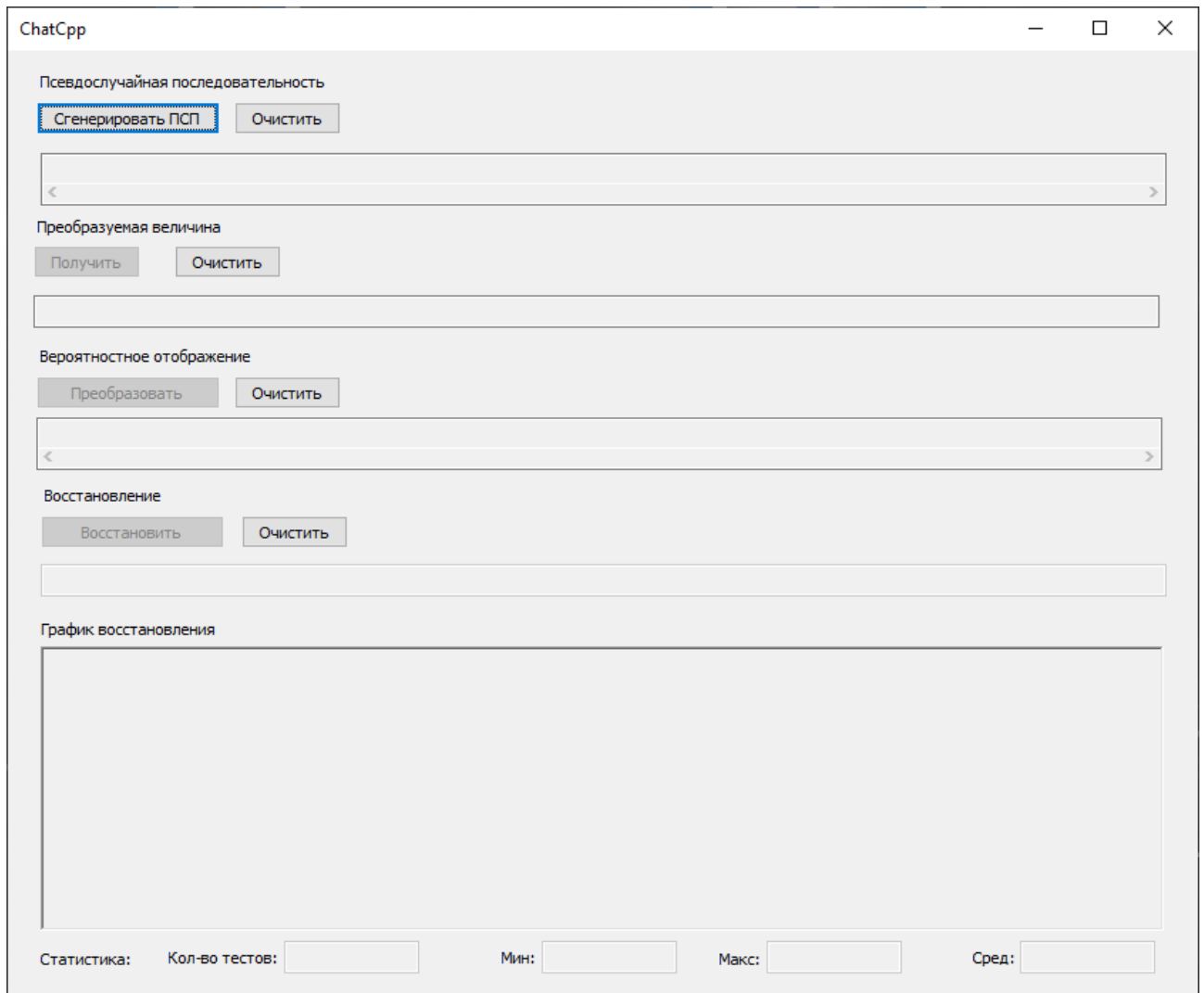


Рисунок 4.15 – Диалоговое окно теста вероятностного кодирования

Сначала доступна только кнопка «Сгенерировать ПСП», так как это самый первый шаг для представления данных в вероятностной форме. После нажатия генерируется псевдослучайная последовательность и становится доступной кнопка «Получить» в группе «Преобразуемая величина» (рисунок 4.16).



Рисунок 4.16 – Генерация ПСП

Также при помощи генератора псевдослучайных чисел получаем преобразуемую величину, т.е. величину, которая будет кодироваться, преобразовываться в последовательность ВО (рисунок 4.17).

The screenshot shows a window titled "ChatCpp" with standard Windows window controls. Inside, there are two main sections. The first section, "Псевдослучайная последовательность" (Pseudorandom sequence), contains two buttons: "Сгенерировать ПСП" (Generate PSP) and "Очистить" (Clear). Below these is a text box containing the sequence "719662974896704760509189548060". The second section, "Преобразуемая величина" (Transformable value), contains two buttons: "Получить" (Get) and "Очистить" (Clear). Below these is a text box containing the value "5".

Рисунок 4.17 – Генерация преобразуемой величины

После становится доступной кнопка «Преобразовать», которая преобразует величину в вектор вероятностного отображения путем сравнения преобразуемой величины и сгенерированной ПСП (рисунок 4.18).

This screenshot shows the same "ChatCpp" window as Figure 4.17, but with an additional section at the bottom. The "Преобразуемая величина" (Transformable value) section remains the same. The new section, "Вероятностное отображение" (Probability mapping), contains two buttons: "Преобразовать" (Transform) and "Очистить" (Clear). The "Преобразовать" button is highlighted with a blue border. Below these buttons is a text box displaying the resulting probability vector: "010001001000011001110100110101".

Рисунок 4.18 – Получение вектора ВО преобразуемой величины

Процесс восстановления вероятно представленных данных происходит при нажатии на кнопку «Восстановить», при помощи

сгенерированной ПСП и вектора вероятностного отображения восстанавливается закодированная величина. Также осуществляется вывод графика быстрого восстановления значения. Записывается статистика, в которой отображается: количество тестов; минимальное, максимальное и среднее количество шагов для быстрого вероятностного восстановления (рисунок 4.19).

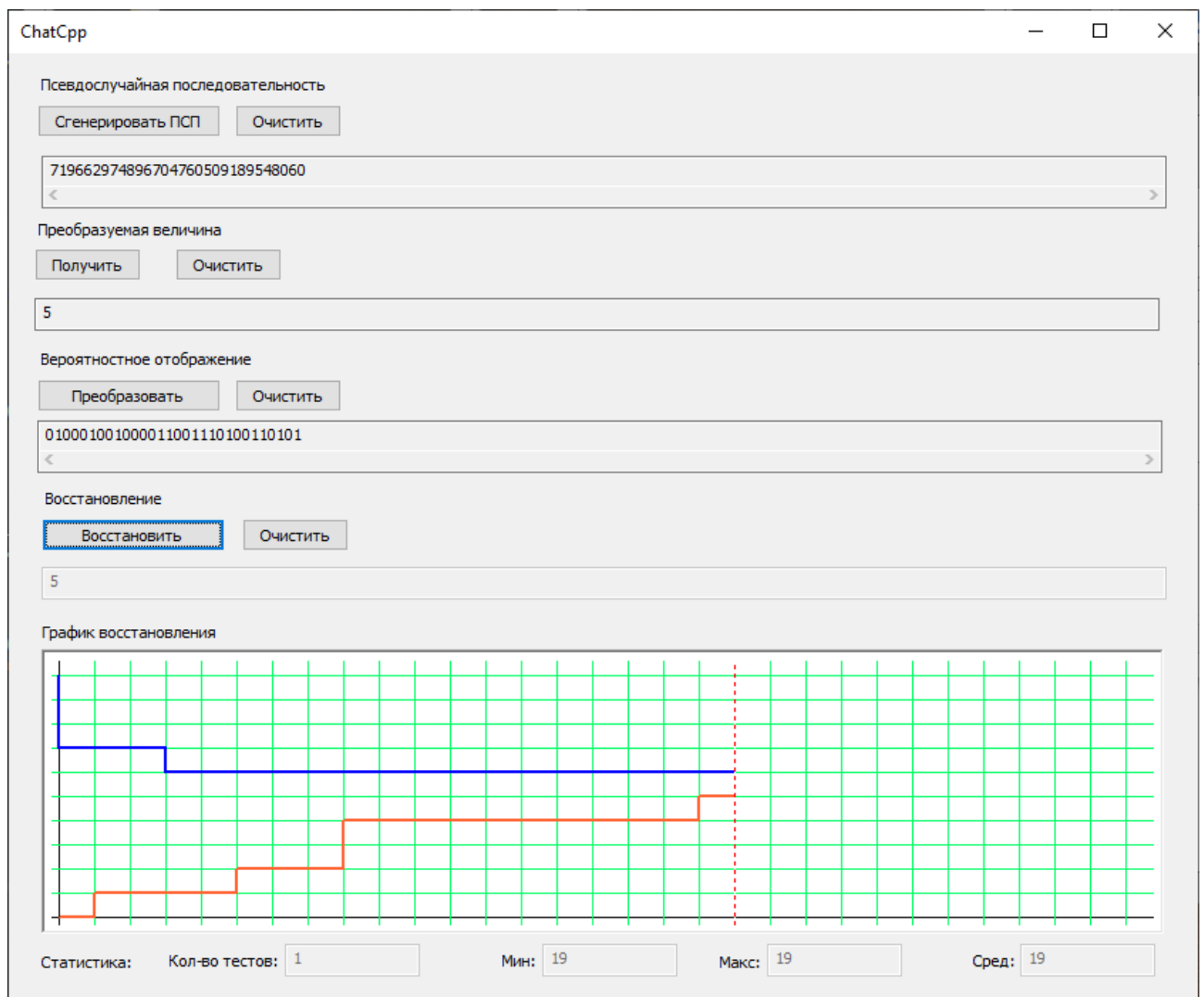


Рисунок 4.19 – Восстановление данных

После выполнения 10 тестов по созданной статистике во время выполнения этих тестов видно, что минимальное количество шагов для декодирования – 2, максимальное – 23, а среднее – всего 9 (рисунок 4.20).

ChatCpp

Псевдослучайная последовательность

Сгенерировать ПСП Очистить

374165944708435358259147109296

Преобразуемая величина

Получить Очистить

7

Вероятностное отображение

Преобразовать Очистить

111111011110111110110111110101

Восстановление

Восстановить Очистить

7

График восстановления

Статистика: Кол-во тестов: 10 Мин: 2 Макс: 23 Сред: 9

Рисунок 4.20 – Выполнение 10 тестов восстановления данных

При передаче без помех скорость восстановления исходного значения очень высока.

Для обработки большого числа данных и сбора статистических данных разработано диалоговое окно «Тест 2». После нажатия на главном окне кнопки «Запустить тест № 2» запустится диалоговое окно (рисунок 4.21).

На рисунке 4.21 изображено поле для ввода сообщения и также функционал для загрузки текстового файла в кодировке UTF-8, нажав на соответствующий CheckBox «Файл как сообщение», станет доступна кнопка «Загрузить файл» и недоступно окно ввода сообщения.

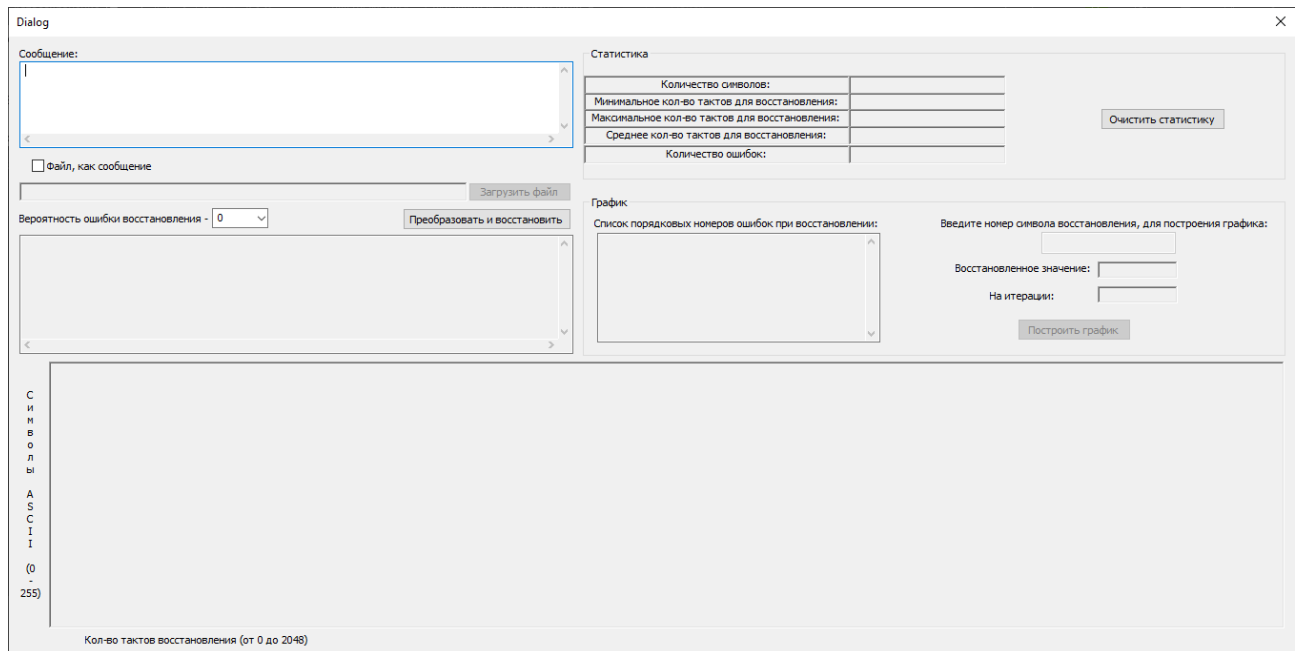


Рисунок 4.21 – Стартовое окно «Тест № 2»

После нажатия на CheckBox и кнопку «Загрузить файл» появляется окно выбора файла на устройстве (рисунок 4.22).

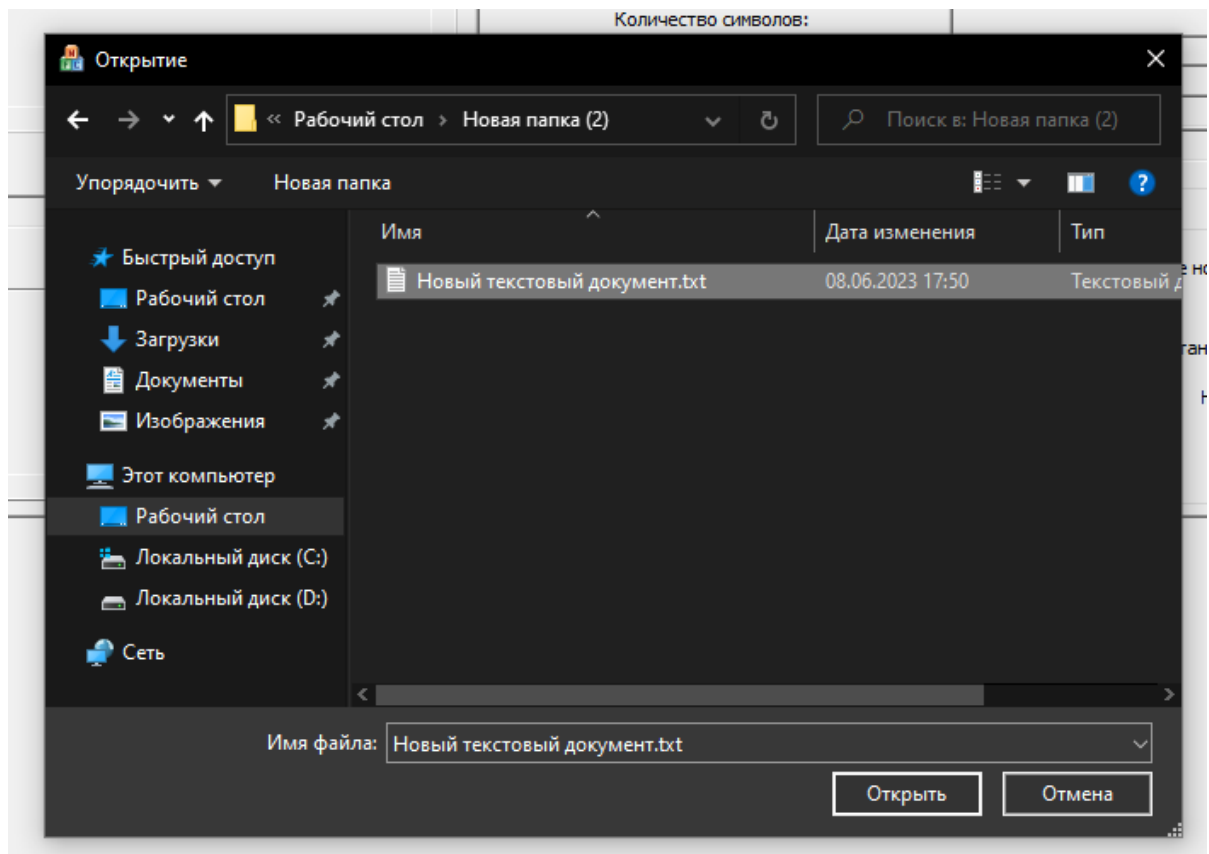


Рисунок 4.22 – Окно выбора файла на устройстве

После нажатия на кнопку «Открыть» в окне программы отобразится путь к выбранному файлу (рисунок 4.23).

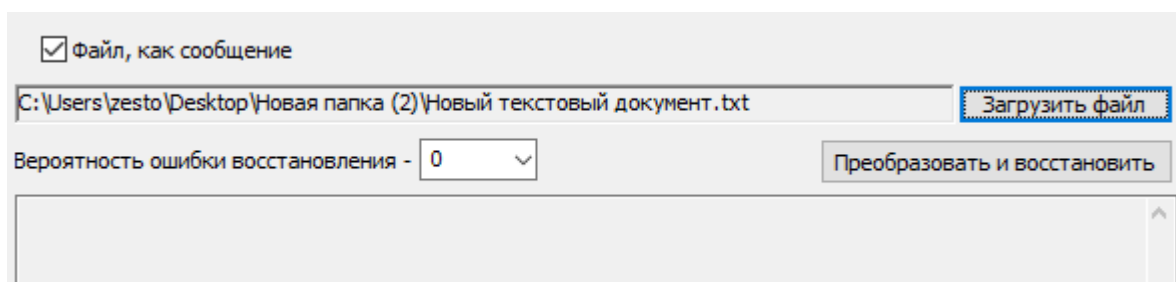


Рисунок 4.23 – Окно программы после выбора файла

Далее можно задать вероятность появления ошибки из выпадающего списка (рисунок 4.24). Протестируем только без ошибки (0) и с самой большой вероятностью (10^{-3}), для примера.

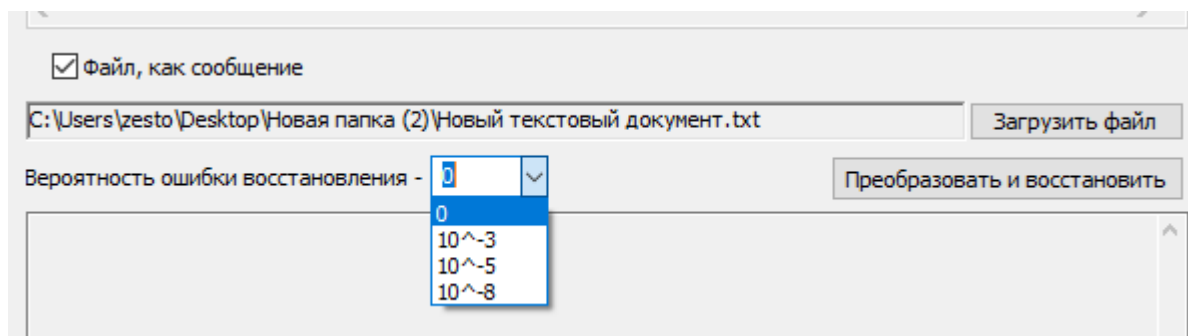


Рисунок 4.24 – Выбор вероятности появления ошибки

После нажатия на кнопку «Преобразовать и восстановить» запускается алгоритм программы. В поле ниже появляются восстановленные данные; справа в блоке «Статистика» появляются статистические данные с количеством передаваемых символов; минимальным, максимальным и средним количеством необходимых тактов для восстановления одного символа. А также количеством ошибок при наличии. Ниже в блоке «График» появляется список ошибок при восстановлении для вывода графика по ошибкам, график можно нарисовать и по данным, переданным без ошибок.

Для этого необходимо в соответствующее поле вписать номер передаваемого символа и нажать на кнопку «Построить график».

На рисунке 4.25 изображено окно программы без ошибки с графиком выбранного порядкового номера символа.

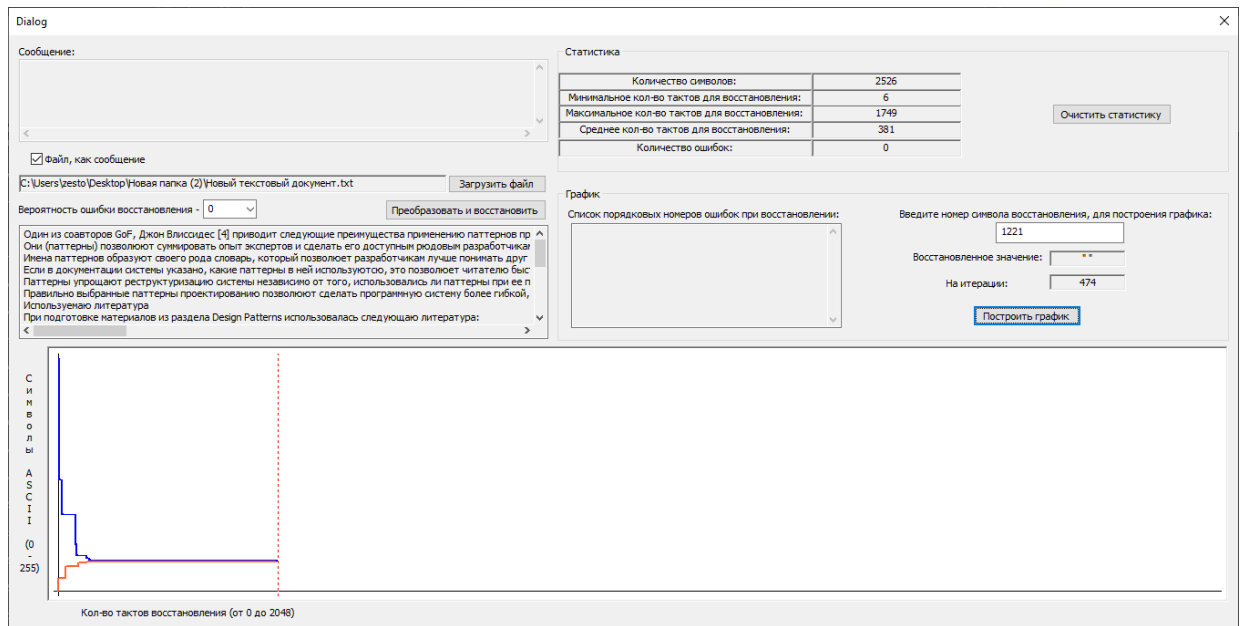


Рисунок 4.25 – Преобразование и восстановление без ошибки

На рисунке 4.26 изображено окно программы с вероятностью ошибки 10^{-3} и графиком по номеру ошибки.

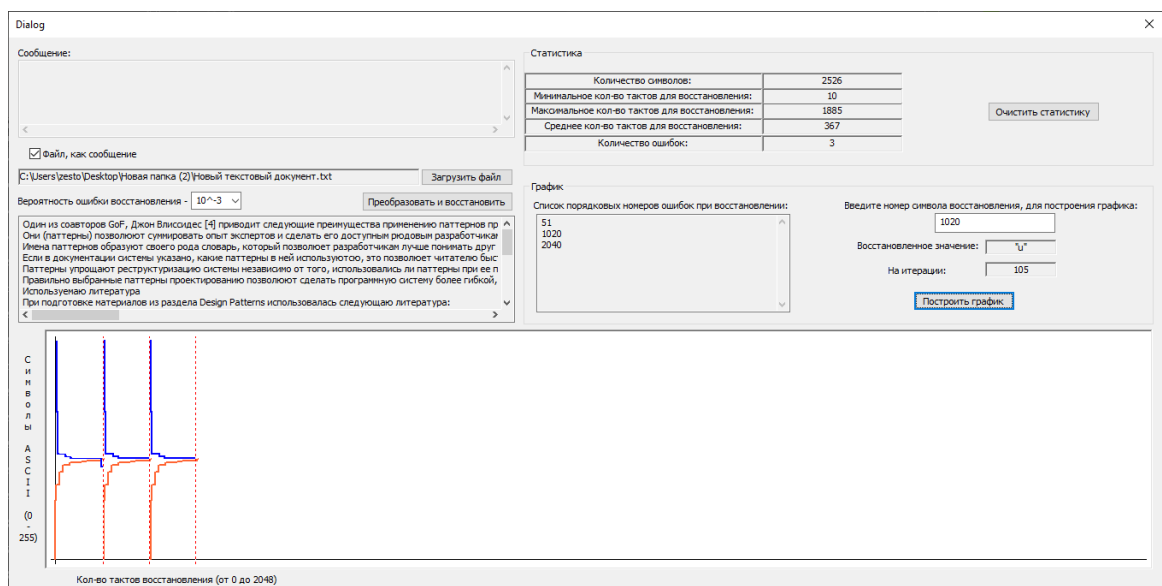


Рисунок 4.26 – Преобразование и восстановление с вероятностью ошибки 10^{-3}

По графику видно, что произошла ошибка при восстановлении, кривые графика пересеклись, поэтому восстановление повторилось ещё 2 раза, и если восстановленные значения одинаковы при этих двух случаях, тогда и восстановленное значение считается верным.

Для сборки статистических данных было произведено преобразование и восстановление текстового файла более чем с 3 млн символов для определения среднего, минимального и максимального количества тактов для восстановления значения, а также количество ошибок. Тесты были произведены с разной вероятностью возникновения ошибки (10^{-3} , 10^{-5} , 10^{-8}), собранная статистика изображена на рисунках 4.27, 4.28, 4.29, соответственно.

Статистика	
Количество символов:	3623399
Минимальное кол-во тактов для восстановления:	1
Максимальное кол-во тактов для восстановления:	2045
Среднее кол-во тактов для восстановления:	476
Количество ошибок:	3624

Рисунок 4.27 – Статистические данные с вероятностью ошибки 10^{-3}

Статистика	
Количество символов:	3623399
Минимальное кол-во тактов для восстановления:	1
Максимальное кол-во тактов для восстановления:	2044
Среднее кол-во тактов для восстановления:	365
Количество ошибок:	363

Рисунок 4.28 – Статистические данные с вероятностью ошибки 10^{-5}

Статистика	
Количество символов:	3623399
Минимальное кол-во тактов для восстановления:	1
Максимальное кол-во тактов для восстановления:	2045
Среднее кол-во тактов для восстановления:	366
Количество ошибок:	1

Рисунок 4.29 – Статистические данные с вероятностью ошибки 10^{-8}

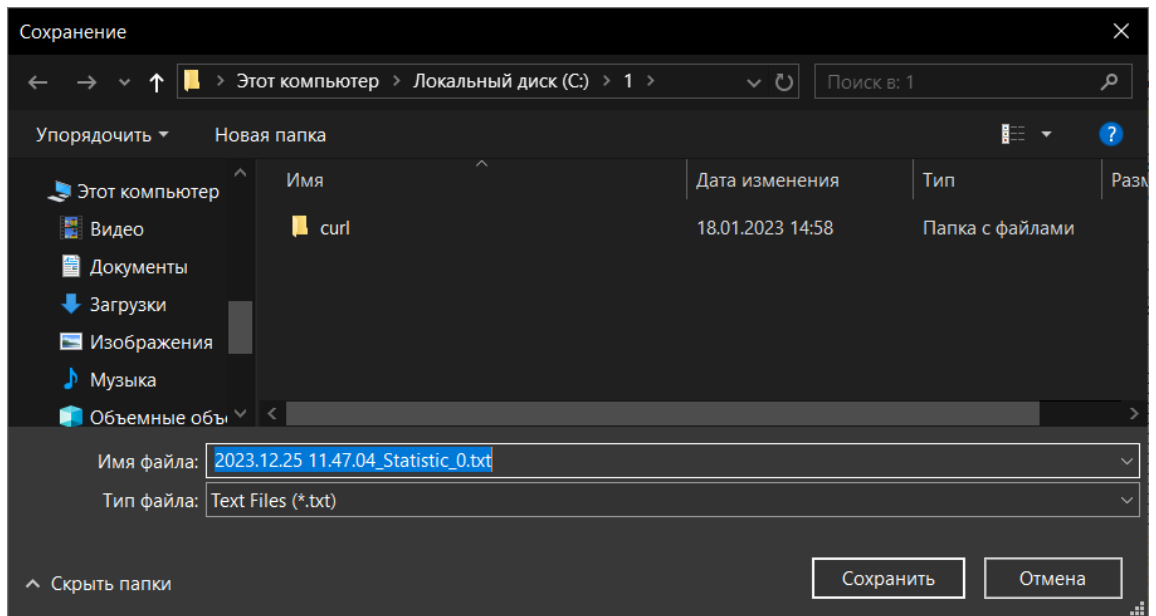


Рисунок 4.31 – Сохранение статистических данных

Эмпирическим путем найдено количество разрядов ВО, ограниченное 2048 значениями, при котором попадание в данный диапазон мало, а при использовании равномерного ГПСР равно 0. Полученную статистику можно сохранить в файл для дальнейшей обработки, для чего необходимо нажать «Записать в файл». Пример показан на рисунке 4.31, по умолчанию в качестве имени файла указывается время, дата и выбранная вероятность появления ошибки.

Полученные данные по циклам обработки ВО разделяются разделителем, в качестве разделителя использован символ «:». Пример сохранённого файла статистики приведен на рисунке 4.32.

Кроме вышеупомянутой полной статистики в файле присутствует и общая статистика по тестированию: обработанное количество символов, минимальное, максимальное и среднее количество тактов, время начала обработки файла и время окончания обработки, а также время (в секундах), затраченное на обработку и заданную вероятность появления ошибки.

При выполнении исследований обработан лог-файл, содержащий техническую информацию (рисунок 4.33), файл содержал 5 757 658 символов.

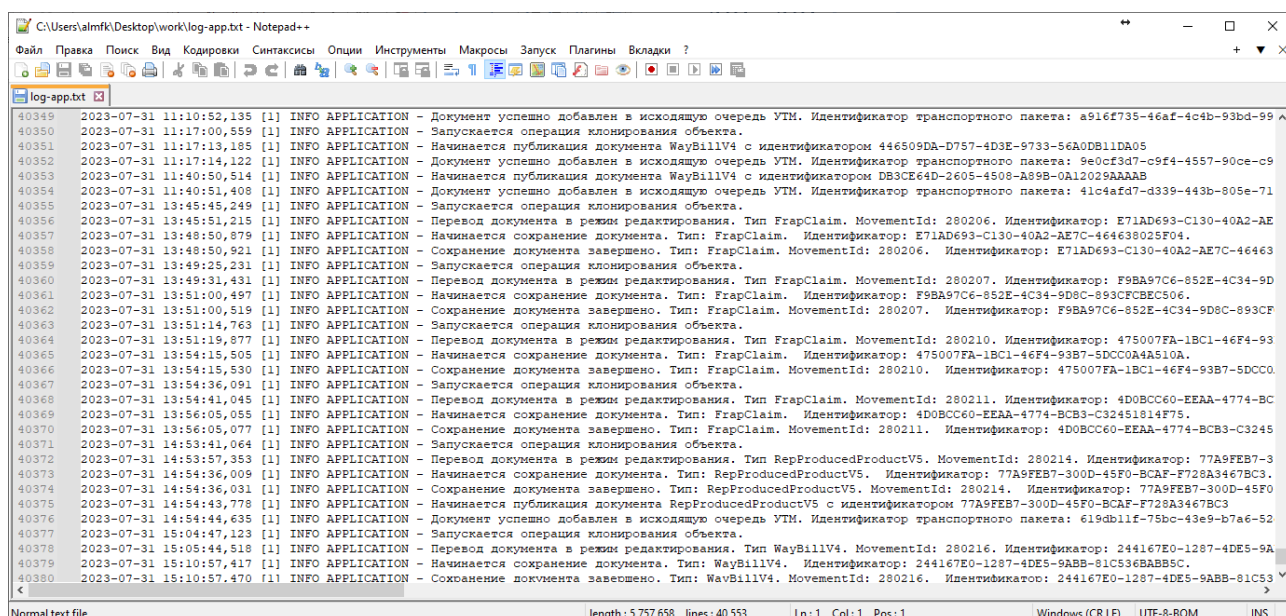
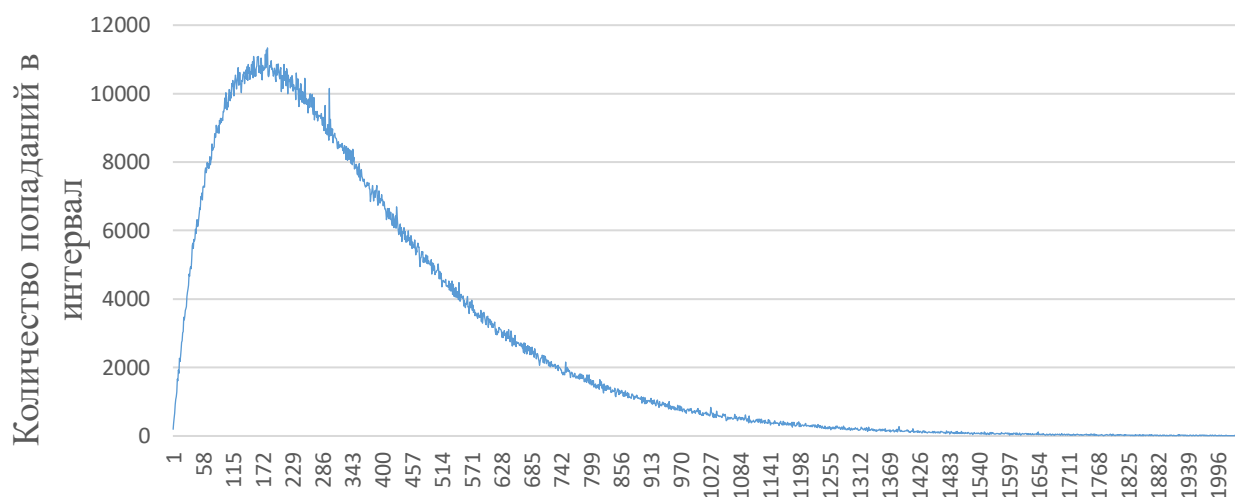


Рисунок 4.33 – Пример обрабатываемого файла

Для более наглядного представления результаты обработки, позволяющие судить о качественных характеристиках, скорости быстрого вероятностного преобразования, представлены в графической форме. Суммарный результат представлен на графике (рисунок 4.34).



Количество испытаний для ВО

Рисунок 4.34 – Суммарный результат по обработке файла

На оси абсцисс расположено количество испытаний, за которые преобразуемая величина восстановлена при помощи быстрого вероятностного преобразования, по оси ординат отображено количество попаданий в указанный диапазон. По суммарным данным, 95% всех циклов обработки выполнены за 896 циклов, максимальные значения от 10000 попаданий приходится на циклы от 117 до 270.

Для наглядности и закономерности необходимо рассмотреть и отдельно некоторые символы. Так, например, для символа «а» (рисунок 3.39) статистика получилась следующей (всего по тексту встретился символ 72268 раза): в 95% случаев приходилось на 898 циклов преобразования, локализация максимумов примерно такая же.

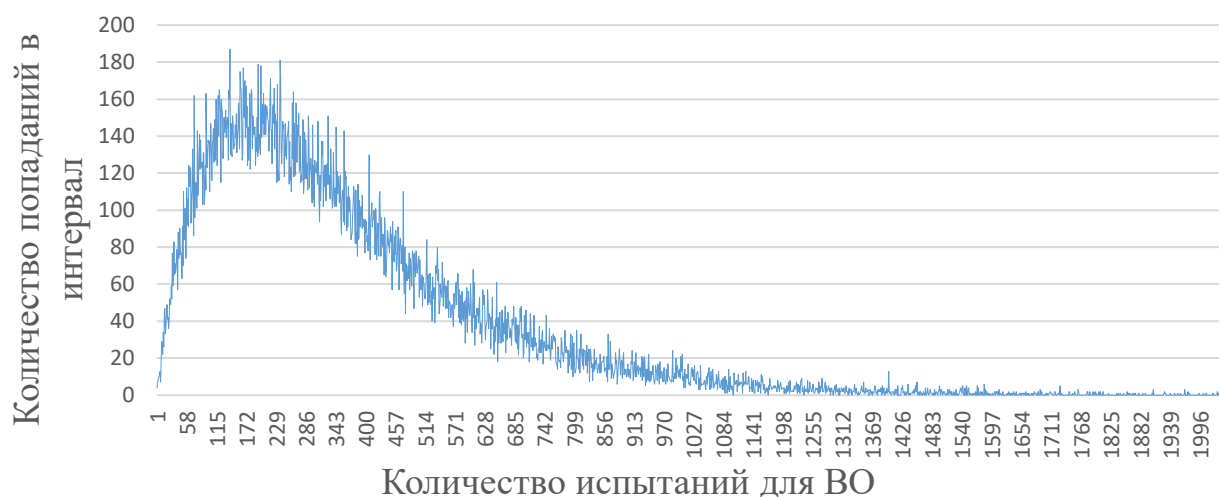


Рисунок 4.35 – Результат по обработке для символа «а»

Для символа «е» (рисунок 4.36) статистика получилась следующей: всего по тексту встретился символ 12375 раза, в 95% случаев приходилось на 891 цикл преобразования, локализация максимумов примерно такая же.

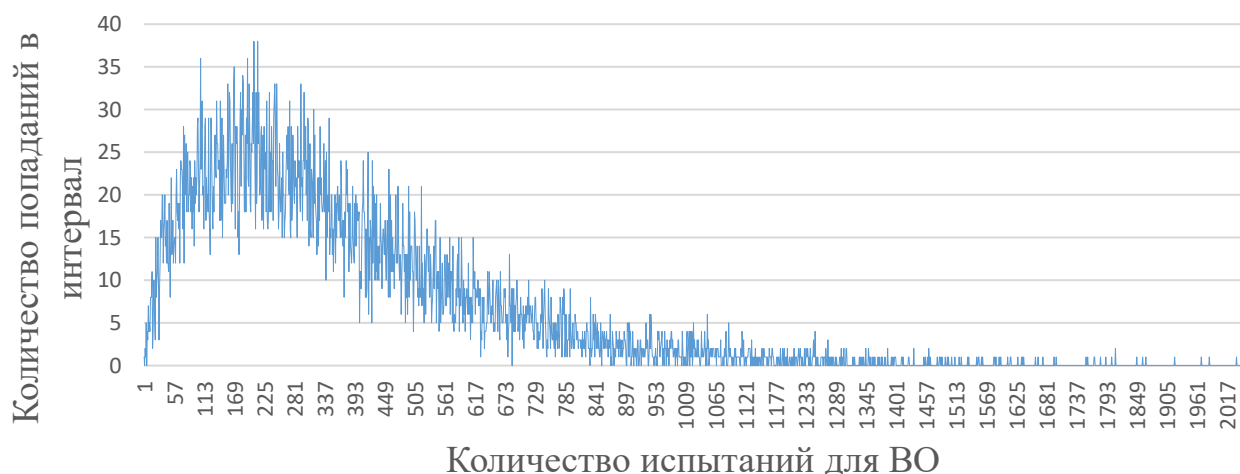


Рисунок 4.36 – Результат по обработке для символа «е»

Для символа «d» (рисунок 4.37) статистика получилась следующей: всего по тексту встретился символ 430331 раз, в 95% случаев приходилось на 883 цикла преобразования, локализация максимумов примерно такая же.

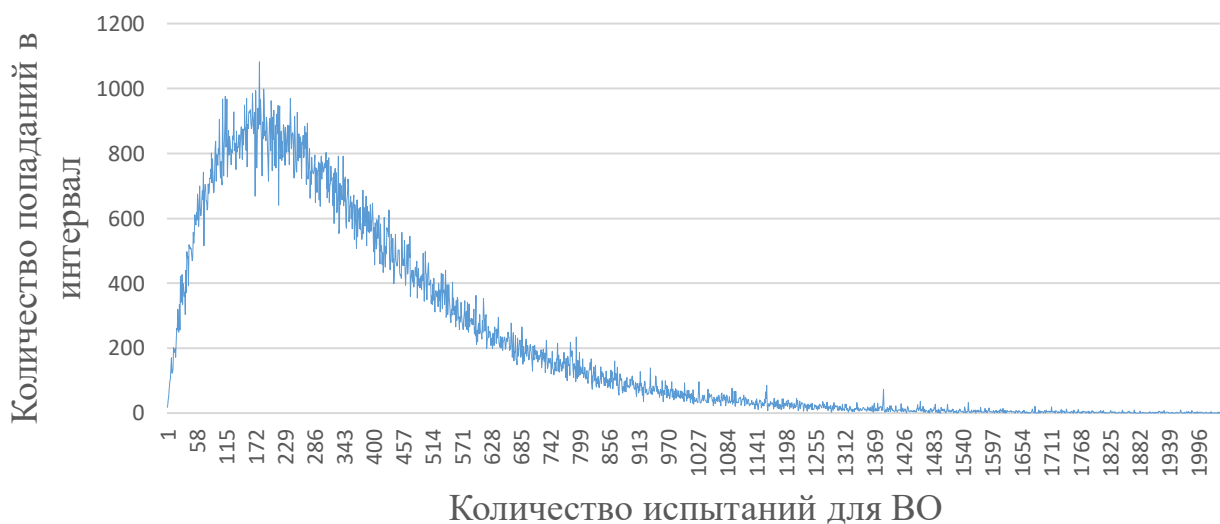


Рисунок 4.37 – Результат по обработке для символа «d»

Впоследствии в ходе исследования свойств и характеристик для выявления зависимостей обработано 14720579 символов, включая некоторые классические литературные произведения. Результирующий график представлен на рисунке 4.38.

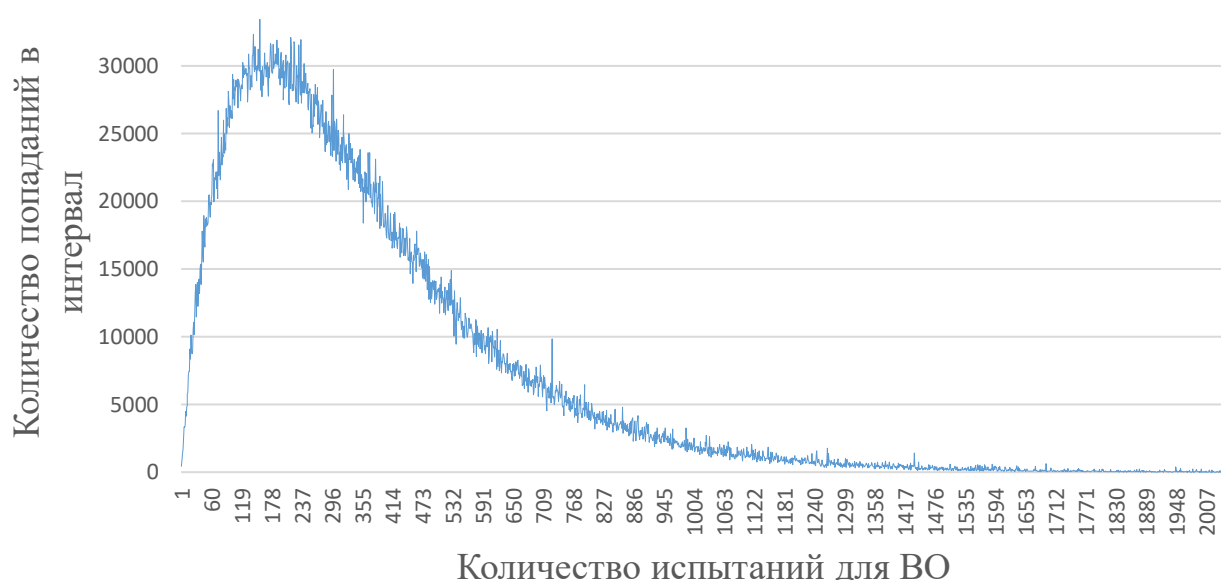


Рисунок 4.38 – Суммарный накопленный результат проведенных испытаний по количеству циклов обработки при быстром вероятностном восстановлении

Согласно суммарно полученных данных, в результате выполнения 14720579 быстрых вероятностных восстановлений (рисунок 4.38) в 95% случаев быстрое преобразование выполнялось за менее чем 896 циклов, локализация максимумов случаев находится в границах от 84 до 309 циклов, в этом диапазоне находятся значения с количеством попаданий преимущественно более 25000 раз, в данной области локализовано более 43% от всех циклов восстановления.

Дальнейшим направлением исследования зависимости количества статистических испытаний для выполнения быстрого восстановления является изучение влияния характеристик ГПСП на данный процесс. На текущем этапе очевидно, что полученные данные линейно зависят от параметров используемого генератора.



Рисунок 4.38 – Изменение нормированного значения дисперсии по полученным результатам быстрого вероятностного преобразования

На рисунке 4.38 приведено изменение нормированного значения дисперсии по полученным результатам. По полученным значениям дисперсии можно сделать вывод о стохастичности полученных данных, которые, в свою очередь, подчеркивают природу вероятностного преобразования.

Равномерность непосредственно влияет на скорость быстрого вероятностного восстановления. При анализе полученных данных (рисунок 4.38) видно, что количество попаданий в диапазон более тысячи циклов вероятностного преобразования для быстрого вероятностного восстановления составляет примерно 3.3%, что, в свою очередь, влияет на скорость быстрого восстановления. Влияние равномерности будет основным, так как чем быстрее будет найдено решение выражения (3.20), тем меньше тактов будет потрачено на быстрое восстановление.

Влияние других параметров, таких как стохастичность и независимость, не так очевидно, одно понятно, что при изменении параметров ГПСП необходимо придерживаться следующих требований:

- изменение характеристик ГПСП не должно приводить к невозможности воспроизведения последовательности, следовательно, не

должно приводить к рассинхронизации ГПСП источника и приемника, так как это приведет к невозможности применения быстрого восстановления;

– изменение характеристик последовательности не должно приводить к значительному аппаратному увеличению используемого решения, так как сама идея применения вероятностного отображения исходит из минималистичности аппаратной базы, что, в свою очередь, ведет к малому энергопотреблению.

Последнее из ограничений будет несправедливо лишь в одном случае, когда вероятностное представление использовано для шифрования, и сложность ГПСП будет напрямую связана с криптостойкостью.

Необходимо отметить, что требуются отдельные, более глубокие исследования всех без исключения параметров ГПСП, так как изменение характеристик может сказаться на скорости быстрого вероятностного восстановления как в сторону увеличения времени восстановления, так и наоборот. Крайне перспективным видится применение быстрого вероятностного преобразования в совокупности с конгруэнтными криптостойкими ГПСП для исследования криптографических характеристик быстрого вероятностного представления.

В рамках работы вопросы зависимости скорости быстрого вероятностного восстановления от характеристик ГПСП не будут затронуты, так как требуют большой, объемной работы. Этой теме будут посвящены дальнейшие исследования.

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 получить новые скоростные характеристики для данных, представленных в вероятностной форме, при сохранении всех преимуществ вероятностного преобразования и специализированных вычислителей на их основе. Увеличение скорости передачи вероятностно представленных данных и повышение скорости их восстановления в совокупности с малыми аппаратными затратами и применением механизмов помехоустойчивости обуславливает не только актуальность исследуемой темы, но и качественно повышают возможности вероятностного представления, расширяя возможности его применения.

4.5. Выводы по главе 4

В главе 4 получены следующие результаты:

1. Предложена система поддержки принятия решений ЛПР на основе полимодельного комплекса, для чего выполнено описание оценочной матрицы и использована геометрическая интерпретация результатов, позволяющая упростить принятие решения для ЛПР, данный подход может быть реализован в виде комплекса программ с применением систем машинного обучения, что в связке с уже имеющимся комплексом программ существенно сократит время принятия решения.

2. Рассмотрена работа комплекса программ полимодельного комплекса на примере, от ввода данных до их получения и представления ЛПР для принятия решения, предложенный комплекс позволяет существенно упростить получение оптимизационных данных, вне зависимости от выбранной модели полученный комплекс программ может быть дополнен критериями оптимизации и способа их представления, имеется в виду стохастическая постановка.

3. Разработан комплекс программ, реализующий помехоустойчивую передачу данных, представленных в вероятностной форме на основе быстрого вероятностного представления.

4. На базе комплекса программ выполнено исследование характеристик быстрого вероятностного восстановления, позволяющего судить о его качественных характеристиках. Полученные данные позволяют с уверенностью утверждать, что применение быстрого вероятностного восстановления будет в 197 раз быстрее, чем в случае классического вероятностного восстановления для ASC II на 128 символов с обеспечением погрешности в 0.39%

5. Предложенный метод быстрого вероятностного преобразования на основе анализа моделей однолинейного однополярного вероятностного представления данных не содержит погрешности восстановления, что существенно упрощает интерпретацию полученных значений.

6. Полученные результаты быстрого вероятностного представления позволяют значительно уменьшить не только время, затрачиваемое на преобразование, но и повысить эффективность использования каналов связи, также данный подход будет актуален при хранении данных в виде значений ВО, существенно сокращая объемы используемой памяти.

7. Намечены направления для дальнейшего исследования зависимости скорости быстрого вероятностного восстановления от качества ГПСЧ, а также исследование в области применения быстрого вероятностного представления в совокупности с криптостойкими ГПСЧ для применения быстрого вероятностного представления в области криптографии и исследования в области гаммирования.

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, ФГКОУ ВО ЧВВМУ им. П.С. Нахимова, 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%. Перспективным 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

СИЛ	система информационной логистики
ЛПР	лицо, принимающее решение
ЦОД	центр обработки данных
ПО	программное обеспечение
ЕГАИС	единая государственная автоматизированная информационная система
МО	математическое ожидание
L	множество имеющихся помехоустойчивых кодов
N	множество имеющихся информационных каналов связи
M	множество вершин
O	множество вершин
ЛКФ	логические критерии функционирования
R_0, S_0, H_0, U_0	индексы, отражающие описание движения единицы трафика по информационному тракту в функциональной последовательности – от источника $г$ к приемнику $о$ по каналу $п$ с использованием помехоустойчивого кода $и$
t_{tshu}	время передачи сетевого трафика в функциональной последовательности
I_{rshu}	объём сетевого трафика в функциональной последовательности
C_{rshu}	стоимость передачи единицы сетевого трафика в функциональной последовательности
λi_{rshu}	интенсивность потоков отказов источника
λg_{rshu}	интенсивность потоков отказов приемника
λc_{rshu}	интенсивность потоков отказов канала связи
$p_{rstu}(t)$	суммарный показатель надежности в функциональной последовательности
$pi_{rshu}(t)$	вероятность безотказной работы источника

$pg_{rshu}(t)$	вероятность безотказной работы приемника
$pc_{rshu}(t)$	вероятность безотказной работы канала связи
X	матрица решений
C	общая стоимость при передаче
ci_{rshu}	стоимость передатчика
cg_{rshu}	стоимость приемника
cc_{rshu}	стоимость канала связи
T	общее время, затрачиваемое на процесс передачи информации
ti_{rshu}	время, затрачиваемое в передатчике
tg_{rshu}	время, затрачиваемое в приемнике
tc_{rshu}	время, затрачиваемое в канале
P	общая вероятность безотказной работы системы
K	общая помехоустойчивость
KI_{rshu}	помехоустойчивость источника
KG_{rshu}	помехоустойчивость приемника
KC_{rshu}	помехоустойчивость канала связи
ΔT	директивный такт
ΔG^*	функция потерь
F	вероятностное отображение
ВО	вероятностное отображение
p'_{ij}	значения, принимаемые ВО
a_i	преобразуемое значение
r_j	случайное значение
S_i	синдром ошибки
$p'_{\text{ош } ij}$	ВО с ошибками
$p'_{\text{в } ij}$	восстановленное ВО
СВП	схема вероятностного преобразования
СВВ	схема вероятностного восстановления

ГПСП	генератор псевдослучайной последовательности
БР	буферный регистр
R_j^0	значения ГПСЧ, при которых $BO = 0$
R_j^1	значения ГПСЧ при которых $BO = 1$
ЛФРС	логическая функция работоспособности системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков, Л.А. Размещение элементов схем ЭВА на основе гибридных интеллектуальных методов / Л.А.Гладков, Н.В.Гладкова, С.Н.Лейба // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2015. - № 4(165). - С. 25-36.
2. Искандеров, Ю.М. Построение моделей интегрированной информационной системы транспортной логистики на основе мультиагентных технологий / Ю.М.Искандеров // "НОВАЯ ЭКОНОМИКА" и основные направления ее формирования: сборник статей Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15 февраля 2016 года. - Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. - С. 62-69.
3. Будко, Н.П. Концептуальная модель подсистемы интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационной сети общего пользования / Н.П.Будко // Системы управления, связи и безопасности. - 2021. - № 5. - С. 65-119. - DOI 10.24412/2410-9916-2021-5-65-119.
4. Патент № 2660831 Российская Федерация, МПК H03M 7/00. Преобразователь двоичный код - вероятностное отображение: № 2017100609: заявлено 10.01.2017: опубликовано 10.07.2018 / Моисеев Д.В., Сапожников Н.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова Министерства обороны Российской Федерации, - 8 с.: ил.
5. Шокин, А.Г. Разработка и построение преобразователя частота - вероятность / Н.Е.Сапожников, Д.В.Моисеев, Е.В.Скрябина, А.Г.Шокин // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. - 2010. - Вып. № 4(36). - С. 217-222.

6. Моисеев, Д.В. Построение преобразователя фаза - вероятность / Д.В.Моисеев // Инновационные научные исследования. - 2021. - № 6-3(8). - С. 292-299. - DOI 10.5281/zenodo.5529136.
7. Шокин, А.Г. Преобразователь напряжение - вероятность, / Н.Е.Сапожников, Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Вестник СевНТУ: сб. науч. труд. - 2011. - Вып. 114. - С. 116-118.
8. Шокин, А.Г. Построение преобразователя фаза - вероятность / Н.Е.Сапожников, Е.В.Скрябина, А.Г.Шокин // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. - Вып. 2(38). - 2011. - С. 228-233.
9. Пряшников, Ф.Д. К вопросу о представлении дискретных сигналов в псевдовероятностной двоичной форме [Электронный ресурс] / Ф.Д.Пряшников, Н.Е.Сапожников, Ю.Ю.Столярчук // ВЕЖПТ. - 2011. - № 9 (54). - С. 4-6. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-predstavlenii-diskretnyh-signalov-v-psevdo-veroyatnostnoy-dvoichnoy-forme>.
10. Патент № 171033 Российская Федерация, МПК G06F 19/00. Параллельный вероятностный сумматор: № 2017100704: заявлено 10.01.2017: опубликовано 17.05.2017 / Сапожников Н.Е., Моисеев Д.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова Министерства обороны Российской Федерации, - 4 с.: ил.
11. Патент № 179930 Российская Федерация, МПК G06F 7/44, G06F 7/70. Вероятностный комбинированный умножитель: № 2017139811: заявлено 15.11.2017: опубликовано 04.07.2019 / Сапожников Н.Е., Лукашенко Е.О., Моисеев Д.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова Министерства обороны Российской Федерации - 7 с.: ил.
12. Моисеев, Д.В. Улучшенная реализация вероятностного вычитания / Д.В.Моисеев // MODERN SCIENCE. - 2021. - № 6-2. - С. 367-373.

13. Моисеев, Д.В. Вероятностное устройство вычисления математического ожидания / Д.В.Моисеев // Инновационные научные исследования. - 2021. - № 5-2 (7). - С. 338-343.

14. Поросенкова, В.В. Информационные технологии в логистике [Электронный ресурс] / В.В.Поросенкова, С.В.Малахов // Молодой ученый. - 2023. - № 19 (466). - С. 21-25. - Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/466/102496/>.

15. Антоненкова, А.В. Анализ информационных систем в логистике [Электронный ресурс] / А. В.Антоненкова, С.В.Шайтура // ТДР. - 2015. - № 5. - С. 105-106. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-informatsionnyh-sistem-v-logistike>.

16. Микова, Е.С. Проблема выбора ERP-систем / Е.С.Микова, А.М.Минитаева // Машиностроитель. - 2012. - № 8. - С. 38-41.

17. Халын, В.Г. Реструктуризация информационной системы региональных распределительных комплексов на основе применения инновационного логистического инструментария [Электронный ресурс] / В.Г.Халын // Пространство экономики. - 2011. - № 2-2. - С. 127-132. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/restrukturizatsiya-informatsionnoy-sistemy-regionalnyh-raspredelitelnyh-kompleksov-na-osnove-primeneniya-innovatsionnogo>.

18. Кузнецова, А.А. Характеристика логистических информационных систем для управления снабжением и сбытом организации [Электронный ресурс] / А.А.Кузнецова // Экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. - 2016. - № 27. - С. 86-91. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristika-logisticheskikh-informatsionnyh-sistem-dlya-upravleniya-snabzheniem-i-sbytom-organizatsii>.

19. 2022 GovTech Maturity Index Update [Электронный ресурс] // World Bank Group Annual Report. - Режим доступа: <https://www.worldbank.org/en/programs/govtech/2022-gtmi>.

20. Государственная автоматизированная информационная система «Управление» (ГАС «Управление») [Электронный ресурс] // Официальный сайт государственной автоматизированной информационной системы "Управление". - Режим доступа: <https://gasu.gov.ru/>.

21. Единая информационная платформа национальной системы управления данными [Электронный ресурс] // Государственный портал «Госуслуги». - Режим доступа: <https://nsud.gosuslugi.ru/>.

22. Удодов, А.Н. Анализ возможностей построения энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей для мониторинга работы двигателей / А.Н.Удодов // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2014. - № 74. - С. 1-11.

23. Воронков, Г.С. Повышение энергоэффективности систем передачи с OFDM на основе дифференциального преобразования сигналов / Г.С.Воронков, И.В.Кузнецов // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). - Самара: Новая техника. - 2017. - С. 741-745.

24. Поросенкова, В.В. Информационные технологии в логистике / В.В.Поросенкова, С.В.Малахов // Молодой ученый. - 2023. - № 19 (466). - С. 21-25. - Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/466/102496/>.

25. Антоненкова, А.В. Анализ информационных систем в логистике [Электронный ресурс] / А.В.Антоненкова, С.В.Шайтура // ТДР. - 2015. - № 5. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-informatsionnyh-sistem-v-logistike>.

26. Антоненкова, А.В. Некоторые аспекты применения логистических технологий в корпоративных информационных системах. От прошлого к современности [Электронный ресурс] / А.В.Антоненкова, В.Г.Герасимова, Ю.Д.Романова // ТДР. - 2016. - № 5. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-primeneniya-logisticheskikh-tehnologii-v-korporativnyh-informatsionnyh-sistemah-ot-proshlogo-k-sovremennosti>.

27. Гришин, Д.С. Проблемы и перспективы развития информационных логистических систем в России на примере субъекта - РТ [Электронный ресурс] / Д.С.Гришин // УЭКС. - 2014. - № 3 (63). - С. 1-13. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-razvitiya-informatsionnyh-logisticheskikh-sistem-v-rossii-na-primere-subekta-rt>.

28. Глушко, В.А. Информационные системы в логистике и проблемы их эффективного применения [Электронный ресурс] / В.А.Глушко, Д.А.Исламова // Молодой ученый. - 2019. - № 2 (240). - С. 207-209. - Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/240/55394/>.

29. Турлаев, Р.С. Развитие единой региональной транспортно-логистической информационной системы Челябинской области [Электронный ресурс] / Р.С.Турлаев // Вестник евразийской науки. - 2016. - № 4 (35). - С. 1-13. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-edinoy-regionalnoy-transportno-logisticheskoy-informatsionnoy-sistemy-chelyabinskoy-oblasti>.

30. Шепелин, Г.И. Современная проблематика информационных технологий в логистике [Электронный ресурс] / Г.И.Шепелин, А.Ю.Дубовик // Экономика и бизнес: теория и практика. - 2017. - № 12. - С. 1-2. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-problematika-informatsionnyh-tehnologiy-v-logistike>.

31. Королев, С.С. Логистические процессы автоматизированных программ в сфере логистики [Электронный ресурс] / С.С.Королев, Г.И.Шепелин // Символ науки. - 2019. - № 10. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/logisticheskie-protsessy-avtomatizirovannyh-programm-v-sfere-logistiki>.

32. Шепелин, Г.И. Основы работы в информационно-логистической системе MultiTransGlobal и предложение по актуализации / Г.И.Шепелин, В.Ю.Перминов [Электронный ресурс] // Инновационная наука. - 2019. - № 12. - С. 49-50. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovy-raboty-v-informatsionno-logisticheskoy-sisteme-multitransglobal-i-predlozhenie-po-aktualizatsii>.

33. Шепелин, Г.И. Преимущества интеграции искусственного интеллекта в логистику [Электронный ресурс] / Г.И.Шепелин, В.А.Никитин // StudNet. - 2022. - № 6. - С. 6833-6838. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-integratsii-iskusstvennogo-intellekta-v-logistiku>.

34. Глухова, Е.А. Информационные системы в логистике западных и отечественных предприятий [Электронный ресурс] / Е.А.Глухова, Г.И.Шепелин // Символ науки. - 2021. - № 8-1. - С. 16-18. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-sistemy-v-logistike-zapadnyh-i-otechestvennyh-predpriyatiy>.

35. Кузменко, Ю.Г. Генезис и развитие систем информационной логистики [Электронный ресурс] / Ю.Г.Кузменко, Г.М.Грейз, И.В.Хатеев // ПСЭ. - 2013. - № 2 (46). - С. 193-197. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/genezis-i-razvitie-sistem-informatsionnoy-logistiki>.

36. Мерзляк, А.В. Логистические, информационные и управленческие аспекты эволюции экономических парадигм от экономики масштаба до сетевой экономики [Электронный ресурс] / А.В.Мерзляк // Российское предпринимательство. - 2015. - № 21. - С. 3910-3932. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/logisticheskie-informatsionnye-i-upravlencheskie-aspekty-evolyutsii-ekonomicheskikh-paradigm-ot-ekonomiki-masshtaba-do-setevoy>.

37. Гришин, Д.С. Исторические аспекты развития информационной логистики [Электронный ресурс] / Д.С.Гришин // УЭКС. - 2014. - № 3 (63). - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoricheskie-aspekty-razvitiya-informatsionnoy-logistiki>.

38. Дмитрук, К.А. Информационно-логистические системы [Электронный ресурс] / К.А.Дмитрук // Молодой ученый. - 2020. - № 19 (309). - С. 17-21. - Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/309/69745/>.

39. Родкина, Т.А. Информационная логистика / Т.А. Родкина. - М.: «Экзамен», 2001. - 288 с.
40. Некрасова, Е.С. Анализ дефиниции термина «информационная логистика» [Электронный ресурс] / Е.С.Некрасова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. - 2015. - № 4. - С. 201-207. - Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/48058/201-207.pdf>.
41. Башкирова, Ю.А. Экономическая сущность понятия «информационная логистика» [Электронный ресурс] / Ю.А.Башкирова, Е.Б.Малей // Устойчивое развитие экономики: международные и национальные аспекты: электронный сборник статей V Международной научно-практической конференции, Новополоцк, 13-14 окт. 2022 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. - Новополоцк. - 2022. - С. 340-345. - Режим доступа: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/37152/1/340-345.pdf>.
42. Медведев, В.А. Информационные системы и технологии в логистике и управлении цепями поставок: учебное пособие / В.А.Медведев, А.С.Присяжнюк. // СПб: Университет ИТМО, 2016. - 183 с.
43. Хэссиг, К. Информационная логистика и менеджмент потока работ/ К.Хэссиг, М.Арнольд // Теория и практика управления. - 1997. - № 5. - С. 9-13 .
44. Ежова, Ю.С. Информационные сети в логистике, их понятие и значение сборник тезисов докладов на конференции. [Электронный ресурс] / Ю.С.Ежова // Приоритетные направления развития современной экономической науки. - Чебоксары: Центр научного сотрудничества Интерактив плюс. - Режим доступа: https://interactive-plus.ru/ru/article/116369/discussion_platform.
45. Волкова, Г.А. Роль информационных технологий в информационной логистике / Г.А.Волкова, О.Н.Суханова // Роль вузовской науки в решении проблем АПК: Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения

профессора Г.Б. Гальдина, Пенза, 24-25 октября 2018 года. Том II. - Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. - 2018. - С. 186-189.

46. Егорова, Л.Э. Информационная логистика на общественном транспорте / Л.Э.Егорова // Логистика - евразийский мост: материалы XIV Международной научно-практической конференции, Красноярск, 24–29 апреля 2019 года. Том Часть 1. - Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет. - 2019. - С. 113-115.

47. Синютин, К.В. Информационная логистика работы городского пассажирского транспорта г. Минска / К.В.Синютин // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 2: Гісторыя. - Эканоміка. Права. - 2022. - № 2. - С. 78-84.

48. Калитин, Д.В. Автоматизация информационной логистики / Д.В.Калитин, К.А.Кондратенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2011. - № 7. - С. 331-333.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. Ferrari, A.M. Dynamic Life Cycle Assessment (LCA) Integrating Life Cycle Inventory (LCI) and Enterprise Resource Planning (ERP) in an Industry 4.0

Environment. / A.M.Ferrari, L.Volpi, D.Settembre-Blundo, F.E.García-Muiña // Journal of Cleaner Production, 286. - 2021. - 125314.

53. Parra, B. Combining ERP, Lean Philosophy and ICT: An Industry 4.0 Approach in an SME in the Manufacturing Sector in Spain. / Parra,B., Pando Cerra,P., Álvarez Peñín,P.I. // Engineering Management Journal. - 2022. - 34(4), - P. 655-670.

54. Tsai, W.H. Applying ERP and MES to Implement the IFRS 8 Operating Segments: A Steel Group's Activity-Based Standard Costing Production Decision Model. / W.H.Tsai, S.H.Lan, H.L.Lee // Sustainability, 2020. - 12(10), 4303.

55. Majstorovic,V. ERP in Industry 4.0 Context. / V.Majstorovic, S.Stojadinovic, B.Lalic, U.Marjanovic, //IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, 2020. - P. 287-294.

56. Башкирова, Ю.А. Экономическая сущность понятия «информационная логистика» [Электронный ресурс] / Ю.А.Башкирова, Е.Б.Малей // Устойчивое развитие экономики: международные и национальные аспекты: электронный сборник статей V Международной научно-практической конференции, Новополоцк, 13-14 окт. 2022 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. - Новополоцк. - 2022. - С. 340-345. - Режим доступа: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/37152/1/340-345.pdf>.

57. Кмита, К.С. Современные информационные технологии в логистике / К.С.Кмита, Н.С.Сенькевич // 72-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов: тезисы докладов, 12-23 апреля 2021 г., Минск: в 4 ч. - Ч. 1. - Минск: БГТУ, 2021. - С. 91-92.

58. Обзор сетевой файловой системы // Microsoft Learn - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/windows-server/storage/nfs/nfs-overview>.

59. Шкинов, В.В. Сетецентрический принцип построения структуры управления потоком беспилотных судов и создание модели автоматической

системы управления транспортным процессом методом синтеза управляющей сети Петри / В.В.Шкинов, В.В.Попов // Транспортное дело. - 2018. - № 6. - С. 252-256.

60. Tangari, G. Decentralized Monitoring for Large-Scale Software-Defined Networks. / G.Tangari, D.Tuncer, M.Charalambides, G.Pavlou // IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM). Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, 2017. - UK. - doi:10.23919/INM.2017.7987291.

61. Claeys, M. Hybrid multi-tenant cache management for virtualized ISP networks. / M.Claeys, D.Tuncer, J.Famaey, M.Charalambides, S.Latre, G.Pavlou, F.DeTurck. // In Journal of Network and Computer Applications, vol. 68, issue C. - 2016. - P. 28-41.

62. Valocchi, D. Extensible signaling framework for decentralized network management applications./ D.Valocchi // In Proc. IEEE/IFIP NOMS, Istanbul, Turkey. - Apr. 2016. - DOI:10.1109/NOMS.2016.7502808.

63. Hendriks,L. Assessing the quality of flow measurements from OpenFlow devices / L.Hendriks, R.Schmidt, R.Sadre, J.Bezerra, A.Pras // In Proc. TMA, Louvain La Neuve. - Belgium. - Apr. 2016.

64. Chowdhury, S. PayLess: a low cost network monitoring framework for software defined networks / S.Chowdhury, M.Bari, R.Ahmed, R.Boutaba. // In Proc. IEEE/IFIP NOMS, Krakow, Poland. - May 2014. - DOI:10.1109/NOMS.2014.6838227.

65. Centelles, R. REDEMON: Resilient Decentralized Monitoring System for Edge Infrastructures. / R.Centelles, M.Selimi, F.Freitag, L.Navarro // Conference proceedings. 2020 20th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGRID), Melbourne, Australia. - 2020. - P. 91-100. - DOI:10.1109/CCGrid49817.2020.00-84.

66. Кочелаба, Ж.В. Анализ рынка ERP-систем в России и за рубежом [Электронный ресурс] / Ж.В.Кочелаба, В.О.Севедин // Сервис в России и за

рубежом. - 2023. № 4 (106). - С. 29-38. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-rynka-erp-cistem-v-rossii-i-za-rubezhom>.

67. Калитин, Д.В. Автоматизация информационной логистики / Д.В.Калитин, К.А.Кондратенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2011. - № 7. - С. 331-333.

68. Тевяшев, А.Д. Стохастические модели и методы оптимизации режимов работы газотранспортных систем [Электронный ресурс] / А.Д.Тевяшев // ТАРИ. - 2013. - №4 (14). - С. 49-51. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/stohasticheskie-modeli-i-metody-optimizatsii-rezhimov-raboty-gazotransportnyh-sistem>.

69. Майер, Р.В. Компьютерное моделирование: моделирование как метод научного познания. Компьютерные модели и их виды [Электронный ресурс] / Р.В.Майер // М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО Глазовский гос. пед. ин-т им. В.Г. Короленко. - Глазов: ГГПИ. - 2015. Научный электронный архив. Режим доступа: <http://econf.rae.ru/article/6722>.

70. Косоруков, О.А. Стохастическая непрерывная модель управления запасами [Электронный ресурс] / О.А.Косоруков, О.А.Свиридова // Вестник РЭА им. Г. В. Плеханова. - 2012. - № 4. - С. 91-95. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/stohasticheskaya-nepreryvnaya-model-upravleniya-zapasami>.

71. Халимов, Н.Р. Распределенная сетцентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов / Н.Р.Халимов, А.В.Мефедов // Системы управления, связи и безопасности. - 2019. - № 3. - С. 1-13. - DOI 10.24411/2410-9916-2019-10301.

72. Гаркуша, С.В. Модель распределения пропускной способности нисходящего канала связи технологии WiMAX с ограничением скорости передачи [Электронный ресурс] / С.В.Гаркуша // Вестник СибГУТИ. - 2014. - № 2 (26). - С. 3-18. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-raspredeleniya-slotov-i-formirovaniya-paketov-dannyh-v-nishodyaschem-kanale-svyazi-tehnologii-wimax>.

73. Ковальский, А.А. Исследование адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи. Часть 1. Обоснование и постановка задачи / А.А.Ковальский // Труды учебных заведений связи, 2017. - №. 1 (3). - С. 57-65.

74. Толбуко, В.Б. Методика исследования каналов связи в сетях будущего с неоднородным трафиком / В.Б.Толбуко // Вестник полоцкого государственного университета. - Серия С. - 2018. - С. 103-107.

75. Бачинский, А.Г. Технология SWOT-анализа [Электронный ресурс] / Н.А.Дмитриев, Д.В.Авласевич, А.А.Кириллов // Форум молодых ученых. - 2020. - № 3 (43). - С. 67-71. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-swot-analiza>.

76. Кленов, Д.В. Разработка математических моделей и алгоритмов для информационных каналов повышенной помехоустойчивости: специальность 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кленов Дмитрий Викторович. - 2020. - 150 с.

77. Канаев, А.К. Способы обнаружения отклонений в функционировании элементов сети передач и данных в интересах системы управления / М.А.Камынина, Е.В.Опарин // БРНИ. - 2012. - № 4 (3). - С. 137-148.

78. Верещагин, А.В. Методы повышения помехоустойчивости передачи информации в радиоканалах мобильных программно-технических комплексов: учебное пособие [Электронный ресурс] / А. В.Верещагин, Н.В.Сотникова // - Санкт-Петербург: БГТУ Военмех им. Д.Ф. Устинова, 2018. - 158 с. - ISBN 978-5-907054-28-8: Б. ц. - Режим доступа: <https://library.voenmeh.ru/cnau/vdArIltHQMpmcx.pdf>.

79. Ефимов, В.В. Алгоритм определения резервной пропускной способности линий передачи транспортной сети телекоммуникационной

системы для многоконтурных защитных структур / В.В.Ефимов // Информация и космос. - 2017. - № 1. - С. 29-33.

80. Горай, И.И. Оценка качества доставки трафика в сети связи смешанной структуры в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, сети связи специального назначения / И.И.Горай, Д.А.Журавлёв, Н.Д.Смотрницкий // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО, 2020): IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 26-27 февраля 2020 года. Том 4. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. - 2020. - С. 98-101. - ISBN 978-5-89160-200-7.

81. Костенко, В.А. Алгоритмы комбинаторной оптимизации, сочетающие жадные стратегии и ограниченный перебор / В.А.Костенко // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2017. - № 2. - С. 48-56. - DOI 10.7868/S0002338817020135.

82. Рыбаков, К.А. Статистические методы анализа и фильтрации в непрерывных стохастических системах / К.А.Рыбаков // Дифференциальные уравнения и процессы управления. - 2017. - № 4. - С. 1001-1005.

83. Шибанов, А.П. Стохастическая модель канала связи с обеспечением параметров качества передачи [Электронный ресурс] / А.П.Шибанов // ЖВТ. - 2003. - № 1. - С. 111-116. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/stohasticheskaya-model-kanala-svyazi-s-obespecheniem-parametrov-kachestva-peredachi>.

84. Бобков, С.П. Использование дискретных стохастических моделей в химической кинетике [Электронный ресурс] / С.П.Бобков, Е.С.Бобкова, В.В.Рыбкин // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. - 2012. - № 9. - С. 35-39. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-diskretnyh-stohasticheskikh-modeley-v-himicheskoy-kinetike>.

85. Perelman, M.I., Tuberculosis epidemiology in Russia: the mathematical model and data analysis / M.I.Perelman, G.I.Marchuk, S.E.Borisov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. - 2004. - V.19. N.4. - P. 305-314.
86. Авилов, К.К. Математические модели распространения и контроля туберкулёза (обзор) / К.К.Авилов, А.А.Романюха // Математическая биология и биоинформатика. - 2007. Т.2. N.2. - С. 188-318.
87. Nosova, E.A. Regional index of HIV infection Risk based on factors of social disadaptation / E.A.Nosova, A.A.Romanyukha // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. - 2009. - V.24. N.4. - С. 325-340.
88. Романюха, А.А. Модель распространения ВИЧ-инфекции в результате социальной дезадаптации / А.А.Романюха, Е.А.Носова // Управление большими системами. - 2011. - Вып. 34. - С. 227–253.
89. Гладкий, В.С. Вероятностные вычислительные модели / В.С.Гладкий. - М.: Наука, 1973. - 300 с.
90. Яковлев, В.В. Стохастические вычислительные машины / В.В.Яковлев, Р.Ф.Федоров. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1974. - 344 с.
91. Федоров, Р.Ф. Стохастические преобразователи информации / Р.Ф.Федоров, В.В.Яковлев, В.Г.Добрис. - Л.: Машиностроение, 1978. - 304 с.
92. 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.
93. 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.

94. 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.

95. 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».

96. 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».

97. 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.

98. Бойченко, В.А. Оценка точности и быстродействия при вероятностной форме представления информации / В.А.Бойченко // Мир компьютерных технологий: сборник статей студенческой научно-технической конференции, Севастополь, 04–07 апреля 2017 года / Научный редактор Е.Н.Мащенко. - Севастополь: Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования Севастопольский государственный университет, 2017. - С. 91-94.

99. Матвеев, А.М. Современные способы борьбы с помехами в радиоэлектронных системах ракетно-космической техники / А.М.Матвеев, В.С.Конищев // Военная мысль. - 2021. - № 4. - С. 101-105.

100. Весоловский, К. Системы подвижной радиосвязи / К.Весоловский; Весоловский Кшиштоф; пер. с пол. Н.И.Рудинского; под ред. А.И.Ледовского. - Москва: Горячая линия - Телеком, 2006. - 536 с. - ISBN 5-93517-248-8.

101. Зайцев, А.П. Технические средства и методы защиты информации: учебник / А.П.Зайцев, Р.В.Мещеряков, А.А.Шелупанов. - Москва: Горячая линия - Телеком, 2012. - 442 с. - ISBN 978-5-9912-0233-6.

102. Петровский, М.В. Методы защиты информации от преднамеренных программных помех / М.В.Петровский, М.И.Данилов // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сборник материалов XXXII Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 24 февраля - 24 2017 года; под общ. ред. С.С.Чернова. - Новосибирск: общество с ограниченной ответственностью Центр развития научного сотрудничества, 2017. - С. 85-92.

103. Semerenko, V. Iterative harddecision decoding of combined cyclic codes / V.Semerenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2018. - Vol. 1, No. 9(91). - P. 61-72. - DOI 10.15587/1729-4061.2018.123207.

104. Могильных, И.Ю. О продолжении пропелинейных структур кода Нордстрёма - Робинсона на код Хэмминга / И.Ю.Могильных // Проблемы передачи информации. - 2016. - Т. 52, № 3. - С. 97-107.

105. Пенин, П.И. Радиотехнические системы передачи информации / П.И.Пенин, Л.И.Филиппов. - М.: Радио и связь, 2019. - 256 с.

106. Шокин, А.Г. Новые методы помехоустойчивого кодирования информации / Н.Е.Сапожников, Д.В.Моисеев, А.Г.Шокин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - Харьков: Технологический центр. - 2012. - № 6/9 (60). - С. 26 - 29.

107. Моисеев, Д.В. Защита информации, представленной в виде псевдовероятностного отображения / Д.В.Моисеев // Modern Science. - 2020. - № 6-2. - С. 289-294.

108. Моисеев Д.В. Выполнение параллельных вычислений при вероятностном представлении данных / Н.Е.Сапожников, Д.В.Моисеев, П.С.Бейнер, Н.В.Бейнер // Технологический аудит и резервы производства. - 2013. - Т. 3. - № 1(11). - С. 9-12.

109. 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.

110. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

А.1 Программа моделирования вероятностного коррелометра

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023616132

Программа моделирования работы вероятностного коррелометра

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Моисеев Дмитрий Владимирович (RU), Скрыбина Елена Валерьевна (RU), Шокин Александр Геннадиевич (RU), Барановский Юрий Александрович (RU)*

Заявка № **2023614983**
Дата поступления **16 марта 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **22 марта 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

А.2 Программа моделирования работы вероятностного арифметического устройства

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616454

Программа моделирования работы вероятностного арифметического устройства

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Моисеев Дмитрий Владимирович (RU), Скрыбина Елена Валерьевна (RU), Шокин Александр Геннадиевич (RU), Цофнас Денис Андреевич (RU)*

Заявка № 2023614974

Дата поступления 16 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 марта 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

А.3 Программа моделирования работы вероятностных преобразователей сигнал-вероятностное отображение и анализа их характеристик

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616232

Программа моделирования работы вероятностных преобразователей сигнал-вероятностное отображение и анализа их характеристик

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Моисеев Дмитрий Владимирович (RU), Скрыбина Елена Валерьевна (RU), Шокин Александр Геннадиевич (RU), Цофнас Денис Андреевич (RU)*



Заявка № **2023614962**

Дата поступления **16 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **23 марта 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

А.4 Программная модель вероятностного устройства для определения статистических характеристик случайного сигнала

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616044

**Программная модель вероятностного устройства для
определения статистических характеристик случайного
сигнала**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Моисеев Дмитрий Владимирович (RU), Скрыбина
Елена Валерьевна (RU), Шокин Александр Геннадиевич
(RU), Захаров Александр Сергеевич (RU)*



Заявка № 2023614975

Дата поступления 16 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 марта 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

А.5 Модуль вероятностного преобразования и восстановления информации

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021665633

МОДУЛЬ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Моисеев Дмитрий Владимирович (RU), Шокин
Александр Геннадиевич (RU), Михайлова Ольга Сергеевна
(RU), Пахомова Анастасия Андреевна (RU)*

Заявка № 2021664738

Дата поступления 21 сентября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 сентября 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

А.6 Полимодельный оптимизационный комплекс решения задач информационной логистики

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025665283

**Полимодельный оптимизационный комплекс решения
задач информационной логистики**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Севастопольский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Моисеев Дмитрий Владимирович (RU), Шокин
Александр Геннадиевич (RU)*



Заявка № **2025663981**
Дата поступления **30 мая 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **11 июня 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Полное наименование: Федеральное государственное учреждение "Федеральная служба по интеллектуальной собственности"
Сокращенное наименование: Роспатент
Юридический адрес: 125009, г. Москва, ул. Ильинская, д. 10/12, стр. 1
Почтовый адрес: 125009, г. Москва, ул. Ильинская, д. 10/12, стр. 1
Телефон: 8 (495) 777-7000
Факс: 8 (495) 777-7001
E-mail: info@rospatent.ru

Ю.С. Зубов

А.7 Программный комплекс быстрого вероятностного преобразования и восстановления информации

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025665173

Программный комплекс быстрого вероятностного преобразования и восстановления информации

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Моисеев Дмитрий Владимирович (RU), Шокин Александр Геннадиевич (RU)*

Заявка № **2025663983**
Дата поступления **30 мая 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **11 июня 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

документ подписан электронной подписью
Сертификат: 0072701030007542406700002006
Владелец: Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2026

