

*На правах рукописи*

МЕРКУШЕВ Олег Владимирович



**МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ  
КОНЕЧНОМУ ПОЛУЧАТЕЛЮ В КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С  
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ**

Специальность 05.13.01 –  
Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ижевск 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»)

Научный руководитель

**Климов Игорь Зенонович,**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты:

**Кузнецов Игорь Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры «Телекоммуникационные системы»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет»

**Поршнев Сергей Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор  
директор Учебно-научного центра «Информационная  
безопасность»  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им.  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация:

Акционерное общество «Российский институт мощного  
радиостроения» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 24 декабря 2020 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, корпус 5 ИжГТУ имени М.Т. Калашникова

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

В.Н. Сяктерев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время большое внимание уделяется надежности доставки сообщений конечным абонентам коммуникационных систем, действующих на больших территориях в условиях отсутствия постоянных надежных линий передачи данных. Подобные коммуникационные системы используются различными службами и играют важную роль в обеспечении обмена данными в труднодоступных районах и при чрезвычайных ситуациях. Отличительными особенностями исследуемых коммуникационных систем являются: динамическая самоорганизующаяся многосвязная топология, отсутствие постоянно действующей функционально выделенной инфраструктуры, обеспечивающей управление потоками данных, периодические и случайные флуктуации параметров среды распространения сигналов, значительное влияние факторов природного и искусственного происхождения, препятствующих обмену данными. Указанные условия функционирования накладывают ограничения на вероятностно-временные показатели качества информационного обмена узлов исследуемых коммуникационных систем, при которых непосредственное взаимодействие узлов является затрудненным, а в некоторых случаях невозможным.

При отсутствии непосредственного взаимодействия информационный обмен между абонентами осуществляется через промежуточные узлы. Многосвязность топологии исследуемой системы обеспечивает существование множества возможных путей доставки сообщений, отличающихся показателями качества и изменяющихся во времени. Управление информационными потоками осуществляется путем формирования путей доставки сообщений, оптимизированных по показателям надежности. Решение такой задачи требует использования положений теории надежности и методов структурно-параметрического синтеза.

Непрерывность информационного обмена в системе обмена данными является одним из основных показателей надежности системы. Из этого утверждения следует, что для оценки оптимальности формируемого маршрута необходим вероятностный критерий, отражающий степень непрерывности информационного обмена абонентов по заданному маршруту в условиях нестационарности топологии коммуникационной системы. Целевая функция оптимизации формируемого маршрута доставки сообщений направлена на максимизацию заданного критерия надежности. Топология исследуемой коммуникационной системе потенциально поддерживает множество возможных маршрутов доставки сообщений. Тогда, выбор основного и альтернативных маршрутов и, как следствие, управление информационными потоками, осуществляется на основе сравнения оценок надежностей маршрутов по заданному критерию.

Элементами маршрута доставки сообщений являются узлы коммуникационной системы и, связывающие их, линии передачи данных. Формирование линий передачи данных, оптимизированных по показателям надежности и адаптируемых к изменениям состояния каналов связи, осуществляется в результате установления и поддержки между узлами отношений соседства. Наличие отношений соседства позволяет узлам с заданной периодичностью обмениваться полученными показателями качества каналов связи, вносить изменения в структуру линий передачи данных и обмениваться информацией о топологии коммуникационной системы.

В диссертационной работе на основе блочно-иерархического принципа и метода структурно-параметрического синтеза определяется структурная схема, состав, набор параметров, алгоритмы обмена данными и методы доступа к среде формируемых линий передачи данных. Результатом структурного синтеза является функциональная блочно-иерархическая структура линии передачи данных, которая является подсистемой маршрута доставки сообщений. В совокупности с решением задачи оптимизации целевой функции, выполняется формирование наилучших маршрутов доставки сообщений. Применение метода параметрического синтеза, блочно-иерархического принципа и положений теории надежности, позволяет синтезировать агрегированную оценку надежности линии передачи данных и, как следствие, маршрута доставки сообщений в пространстве показателей надежности элементов, являющихся подсистемами маршрута.

Главными задачами при формировании оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационной системе с нестационарной топологией являются: синтез функциональной блочно-иерархической структуры маршрута доставки сообщений, разработка моделей надежности и параметрический синтез элементов маршрута доставки сообщений, разработка метода оценки надежности маршрутов доставки сообщений, определение критерия оценки надежности маршрутов доставки сообщений и разработка имитационной модели для оценки эффективности синтезированных структур, алгоритмов и методов. В этой связи разработка метода оценки надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с нестационарной топологией является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Вопросы концептуального применения коммуникационных систем дальнего действия рассмотрены в работах авторов: Макаренко С.И., Шунулин А.В., Николаев В.И., Боговик А.В. и т.д., что позволяет сделать выводы о востребованности решения задачи определения надежности маршрутов передачи данных.

Разработке методов оценки надежности передачи данных, надежности приема дискретных сообщений и помехозащищенности коммуникационных систем с радиодоступом уделено большое внимание в работах отечественных и зарубежных ученых: Комарович В.Ф., Сосунов В.Н., Хмельницкий Е.А., Головин О.В., Мартынов Ю.М., Финк Л.М., Благовещенский Д.В., Долуханов М.П., Багдади Е.Д., Кловский Д.Д., Девис К., Всехвятская И.С., Макаров С.Б., Цикин И.А., Хазан В.Л., Скляр Б., Простов С.П., Бухвинер В.Е. и других. По оценке авторов, для повышения надежности передачи данных требуется решать задачи: адаптации узлов к изменяющимся условиям информационного обмена, прогнозирования качества принимаемых носителей информации, применение ретрансляции данных в случае отсутствия непосредственного взаимодействия узлов.

Для обеспечения непосредственного взаимодействия узлов необходимо выполнить формирование линий передачи данных, действующих в условиях нестационарности среды носителей информации. Разработке методов доступа к среде, алгоритмов и протоколов обмена данными на канальном уровне посвящены работы отечественных и зарубежных авторов: Вишневский В.М., Березко М.П., Федотов Е.В., Клейнрок Л., Gerla M., Bertsekas D., C. Perkins, D. Johnson, B. Albrightson, J.J. Garcia-Luna-Aceves, J. Boyle, R. Gallager и т.п. Приведенные в работах авторов методы, алгоритмы и протоколы создают основу для реализации функций обмена данными и идентификации параметров непосредственного взаимодействия узлов исследуемой коммуникационной системы. Однако, для обеспечения непосредственного обмена данными в условиях нестационарности каналов связи необходимо формирование линий передачи, оптимизированных по показателям надежности и адаптируемых к изменениям качества каналов связи.

При невозможности непосредственного взаимодействия доставка сообщений абонентам должна выполняться ретрансляцией пакетов данных через промежуточные узлы по определенным маршрутам. В работах отечественных и зарубежных ученых и инженеров: Вишневский В.М., Березко М.П., Федотов Е.В., Клейнрок Л., Gerla M., Bertsekas D., C. Perkins, D. Johnson, B. Albrightson, J.J. Garcia-Luna-Aceves, J. Boyle, R. Gallager, V. Park, S. Corson, T. Clausen, P. Jacquet, Гликман Ю. К., Абдель-Джалил Джихад Надир, Шамин П. Ю., Васильев Д.С. рассмотрены различные варианты формирования маршрутов доставки сообщений в коммуникационных системах с многосвязной топологией. Однако, для формирования наилучших по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в условиях нестационарности топологии необходимы: установление и поддержка между узлами отношений соседства, сбор и обработка статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов, определение алгоритмов обмена данными, обеспечивающих взаимодействие соседних узлов, синтез структурно-параметрический синтез блочно-иерархической структуры линии передачи данных и маршрута доставки сообщений, оптимизация показателей надежности формируемых линий передачи данных и маршрутов доставки сообщений и оценка надежности полученных возможных маршрутов доставки сообщений по заданному критерию.

Определить функциональную структуру и синтезировать параметры маршрута доставки сообщений возможно на основе метода структурно-параметрического синтеза, блочно-иерархического принципа и методов теории надежности, приведенных в работах авторов: Половко А.М., С.В. Гуров, Острейковский В.А., Игуду К.А. и др.

При определении путей доставки сообщений в условиях многосвязной топологии потенциально поддерживается множество вероятных маршрутов передачи данных. Для определения основных и альтернативных маршрутов доставки сообщений в условиях нестационарности топологии коммуникационной системы необходим критерий оценки надежности. В настоящее время ряд протоколов маршрутизации, действующих в коммуникационных системах с потерями, используют различные параметры оценки надежности маршрутов доставки сообщений, что показано в работах авторов: Датьев И.О., Subramanian A.P., Perkins C., Belding-Royer E., Das S., VenkatMohan S., Kasivis-wanath N., Liang M., Denko M.K., Draves R., Padhye J., Zill B., Yang Y., Wang J., Kravets R., Owczarek P., Zwierzykowski P., Franceschetti M. и стандарте RFC 6551. В приведенных работах формирование метрик маршрутов основано на оценке качества принимаемого сигнала или количестве потерянных кадров. Однако, для решения задачи формирования оптимального по критерию надежности маршрута доставки сообщений, а также определения основных и альтернативных маршрутов необходимо разработать методы формирования и оценки надежности по заданному критерию маршрутов доставки сообщений конечному получателю.

**Объектом исследования** являются коммуникационные системы с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией.

**Предметом исследования** является процесс формирования оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией.

**Целью исследования** является разработка метода оценки надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с нестационарной топологией.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить идентификацию элементов исследуемой коммуникационной системы, включающую: анализ особенностей и идентификацию параметров качества среды информационного обмена, анализ методов и алгоритмов непосредственного взаимодействия узлов, анализ топологии, методов формирования маршрутов доставки сообщений в коммуникационных системах с потерями и исследование существующих критериев оценки их надежности.
2. Выполнить исследование процессов обмена данными в условиях нестационарности среды передачи данных, включающее: анализ процесса непосредственного взаимодействия узлов, синтез структуры узла исследуемой коммуникационной системы, идентификацию параметров взаимодействия узлов в средах установления соединения и передачи данных, а также в процессе установления и поддержки отношений соседства.
3. Разработать метод оценки надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационной системе с нестационарной топологией, включающий: структурно-параметрический синтез маршрута доставки сообщений в пространстве параметров надежности, идентификацию параметров надежности линии передачи данных, определение метода оценки надежности физической среды, структурно-параметрический синтез трассы установления соединения в пространстве параметров надежности, идентификацию параметров надежности узла следующего перехода, структурно-параметрический синтез трассы передачи данных в пространстве параметров надежности, структурно-параметрический синтез линии передачи данных в пространстве параметров надежности.
4. Для оценки эффективности полученных в диссертационной работе структур, алгоритмов и методов разработать имитационную модель исследуемой коммуникационной системы и выполнить моделирование процессов формирования оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений, включающее: анализ показателей надежности каналов связи коммуникационной системы, формирование трассы установления соединения и анализ показателей её надежности, анализ показателей надежности узла следующего перехода,

формирование трассы передачи данных и анализ показателей её надежности, формирование линии передачи данных и анализ показателей её надежности, формирование возможных маршрутов доставки сообщений, оптимизированных по критерию надежности, выбор основного и альтернативных маршрутов доставки сообщений.

#### **Научная новизна:**

1. *Разработан* алгоритм структурно-параметрического синтеза системы доставки сообщений конечному получателю. Предложенный алгоритм основан на блочно-иерархическом принципе и позволяет формировать маршруты доставки сообщений оптимизированные по критерию надежности в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией. (соответствует пункту 7 паспорта специальности).
2. *Разработан* метод оценки надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю. Предложенный метод основан на анализе показателей качества каналов связи и параметрическом синтезе, составляющих маршрут элементов, в совокупности с блочно-иерархическим принципом. Предлагаемый метод позволяет получить вероятностную характеристику исправного состояния возможного маршрута доставки сообщений в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией (соответствует пункту 11 паспорта специальности).
3. *Разработан* критерий оценки условной непрерывности информационного обмена в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией (соответствует пункту 3 паспорта специальности).
4. *Разработана* имитационная модель исследуемой коммуникационной системы, предназначенная для оценки эффективности синтезированных в диссертационной работе схем, алгоритмов и методов, обеспечивающих формирование оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией (соответствует пункту 3 паспорта специальности).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработанные схемы, алгоритмы и методы позволяют:

- выполнить формирование оптимизированных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений конечным абонентам коммуникационной системы, действующей в условиях, значительного влияние факторов, препятствующих обмену данными, отсутствия постоянно действующей функционально выделенной инфраструктуры, обеспечивающей управление потоками данных и нестационарной многосвязной топологии;
- оценить надежность вероятных маршрутов доставки сообщений конечному получателю и выполнить выбор основных и альтернативных маршрутов основываясь на показателях их надежности;
- минимизировать время принятия решения о выборе маршрута доставки сообщений конечному абоненту в случае возникновения требования обслуживания.

**Методология и методы исследования.** В работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. Были использованы методы и процедуры системного анализа: исследование системы, идентификация её компонентов, анализ взаимосвязей между элементами, исследование процессов обмена данными, структурно-параметрический синтез на основе блочно-иерархического принципа, построение моделей, синтез критериев, имитационное моделирование. Диссертационная работа основана на методах и положениях теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, теории массового обслуживания, теории информации, теории надежности и основах проектирования систем передачи данных. Применены методы математического и компьютерного моделирования.

Математическое моделирование выполнялось с использованием систем «Matlab» и «Mathematica». Экспериментальные исследования проводились на основе разработанной автором имитационной модели исследуемой коммуникационной системы с многосвязной самоорганизующейся топологией и нестационарными каналами связи т.н. «Эстафета».

Экспериментальные исследования проводились на моделях, построенных в системе дискретного имитационного моделирования OMNeT++, соответствующих условиям функционирования исследуемой коммуникационной системы, действующей в ДКМ диапазоне частот.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм структурно-параметрического синтеза системы доставки сообщений конечному получателю. Предложенный алгоритм основан на блочно-иерархическом принципе и позволяет формировать маршруты доставки сообщений оптимизированные по критерию надежности в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией. (соответствует пункту 7 паспорта специальности).
2. Метод оценки надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю. Предложенный метод основан на анализе показателей качества каналов связи и параметрическом синтезе, составляющих маршрут элементов, в совокупности с блочно-иерархическим принципом. Предлагаемый метод позволяет получить вероятностную характеристику исправного состояния возможного маршрута доставки сообщений в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией (соответствует пункту 11 паспорта специальности).
3. Критерий оценки условной непрерывности информационного обмена в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией (соответствует пункту 3 паспорта специальности).
4. Имитационная модель исследуемой коммуникационной системы, предназначенная для оценки эффективности синтезированных в диссертационной работе схем, алгоритмов и методов, обеспечивающих формирование оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией (соответствует пункту 3 паспорта специальности).

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов подтверждается разработанными и существующими методами оценки надежности технических систем, а также итогами выполненного компьютерного и имитационного моделирования.

Теоретические положения, полученные в работе, обосновываются последовательным и корректным применением математического аппарата при выводе аналитических выражений. Методы, алгоритмы и программы, созданные и применяемые в ходе работы, основаны на положениях теории вероятности и математической статистики, теории систем массового обслуживания, теории случайных процессов, теории информации, теории проектирования компьютерных сетей, систем связи, теории надежности.

Корректность используемых математических и имитационных моделей и их адекватность реальным физическим процессам подтверждается выполненными в диссертационной работе компьютерными экспериментами.

В пакетах программ математического моделирования: «Matlab», «Mathematica», симуляторе дискретных событий: «OMNet++» и созданных программных системах т.н. «Эстафета» и «МодУС» была осуществлена реализация разработанных алгоритмов и методов, выполнена проверка разработанных теоретических положений.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, сформулированные в диссертации, не противоречат известным положениям: теории массового обслуживания, статистической теории связи, теории случайных процессов, теории надежности, теории передачи дискретных сообщений, теории передачи информации. Научные результаты использованы в АО «Сарапульский радиозавод» при разработке изделий комплекса «Намотка-1», а также кафедрой «Информационная безопасность в управлении» Удмуртского государственного университета в учебном процессе по дисциплинам «Основы информационно – коммуникационных технологий и сетевое администрирование», «Вычислительные сети. Контроль безопасности в коммуникационных сетях».

Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и всероссийских конференциях:

- VI международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Казань – 2007;
- XV международной конференции DSPA-2013. Российское научно-техническое общество радиотехники, электротехники и связи имени А.С. Попова, Москва;
- Международной научно-практической конференции «Результативная инновационная деятельность как фактор обеспечения национальной безопасности», Ижевск – 2010;
- Научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2013) и НПФ «Саквое» - 2013;
- II международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электроника и связь. РЭИС-2013», Омск – 2013;
- Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электроника и связь. РЭИС-2015», Омск – 2015.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 3 опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстрированного материала и 3-х приложений (А, Б, В). Содержит 191 стр. машинописного текста, 55 рисунков, список использованной литературы из 114 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит общую характеристику работы, анализ научно-технической информации по теме диссертационной работы, определение целей и задач исследования, обоснование актуальности темы, основные положения, представленные к защите.

**В первой главе** выполнен анализ свойств физической среды, действия мешающих факторов, методов доступа к среде и алгоритмов обмена данными, методов формирования маршрутов доставки сообщений и определения условного расстояния до узла назначения в исследуемой коммуникационной системе. На основе выполненного анализа сформулированы требования к формированию оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в исследуемой коммуникационной системе.

Особенности среды распространения сигналов исследуемой коммуникационной системы создают условия для формирования нестационарной многосвязной топологии системы с разделением узлов на соседние и удаленные. Обмен данными между соседними узлами осуществляется средствами линий передачи данных. Доставка сообщений удаленным узлам выполняется по маршрутам, элементами которых являются линии передачи данных. Для формирования маршрутов доставки сообщений в условиях нестационарности топологии требуется снизить интенсивность возникновения событий изменения топологии, связанных с изменением качества линий передачи данных, и выполнять формирование маршрутов передачи данных по критерию их надежности, учитывая особенности среды распространения сигналов.

Для определения качества среды распространения сигналов каждый узел коммуникационной системы выполняет сбор и обработку показателей качества принимаемых от соседних узлов сигналов. Полученные результаты позволяют на заданном интервале времени для каждого отношения соседства определить показатели надежности информационного обмена и сформировать среду передачи данных, обеспечивающую взаимодействие узлов в режимах множественного и «точка-точка» доступа при нестационарности среды распространения сигналов и различных условиях приема разнесенными узлами.

Для формирования среды передачи данных, обеспечивающей требуемый уровень надежности обмена данными, между узлами необходимо поддерживать отношения соседства, использовать методы резервирования каналов, сменяющих друг друга периодически в соответствии с заданным алгоритмом или при снижении показателей качества информационного обмена. Определение изменения показателей качества выполняется на основе



формируемых между узлами отношений соседства. В результате анализа особенностей обмена данными в исследуемой коммуникационной системе сделан вывод о необходимости функционального разделения среды обмена данными на: среду установления соединения, поддерживающую командное взаимодействие при конкурентном доступе и обеспечивающую определение каналов обмена данными с оптимальными показателями качества, и среду передачи данных, формируемую для каждой пары соседних узлов, характеризуемую оптимальными показателями надежности, поддерживающую непосредственную передачу полезных данных в режиме «точка-точка» между соседними узлами. Тогда, для организации взаимодействия узлов в среде установления соединения должны применяться протоколы и алгоритмы синхронного конкурентного доступа к среде обмена данными. Напротив, для взаимодействия узлов в среде передачи данных должны применяться протоколы и алгоритмы асинхронного доступа в режиме «точка-точка». Следовательно, процесс передачи данных между соседними узлами состоит из этапов установления соединения и передачи данных. В этом случае среды установления соединения и передачи данных являются элементами линии передачи данных, обеспечивающей взаимодействие соседних узлов. Надежность линий передачи данных зависит от надежности обмена данными средах установления соединения и передачи данных. Непрерывность передачи информации является важным показателем работы особенно в условиях нестационарности среды распространения сигналов. Следовательно, формирование линий передачи данных должно выполняться с оптимизацией показателей их надежности.

Каждый узел исследуемой коммуникационной системы выполняет поиск соседних с ним узлов, формируя для каждой пары соседских отношений линию передачи данных. В этом случае, коммуникационная система обладает самоорганизующейся динамической многосвязной топологией типа Mesh, что позволяет потенциально поддерживать множество вероятных маршрутов доставки сообщений. Для формирования маршрутов доставки сообщений необходимо выполнение следующих условий:

- узлы коммуникационной системы самостоятельно формируют маршруты доставки сообщений удаленным узлам на основе поддерживаемых отношений соседства и обмена маршрутной информацией;
- доставка сообщений удаленным абонентам в условиях нестационарности топологии должна осуществляться по маршрутам, оптимизированным по критерию надежности;
- оптимизация надежности маршрутов передачи данных осуществляется на основе оптимизации надежности линий передачи данных, входящих в состав маршрута.

Решение поставленной задачи достигается при формировании линий передачи данных с обладающих малой зависимостью от состояния физической среды.

Для оптимизации маршрутов доставки сообщений по критерию надежности необходимо определить функцию условного расстояния до узла назначения, формирующую значение метрики маршрута доставки сообщений в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут, как систему.

Таким образом, основными результатами первого раздела являются обоснование актуальности темы исследования и сформулированные задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** предложены порядок использования физических каналов и структура узла исследуемой коммуникационной системы, определены методы доступа к средам установления соединения и передачи данных и алгоритмы обмена данными, для заданных алгоритмов получены зависимости времени выполнения установления соединения и передачи данных в условиях действия мешающих факторов характерных для исследуемой коммуникационной системы, определены условия установления и поддержки отношений соседства.

Для обнаружения соседних узлов, установления с ними отношений соседства, обеспечения командного взаимодействия соседних узлов в условия нестационарности физической среды, определения для каждого отношения соседства наиболее надежных каналов обмена данными выполнено функциональное разделение множества физических каналов  $E$  на подмножества каналов установления соединения  $E_{УС} \in E$  и передачи данных  $E_{ПД} \in E$ . Соответственно, процесс

передачи данных между соседними узлами состоит из этапов: установления соединения, запроса готовности узла следующего перехода и передачи данных.

На основе подмножества каналов установления соединения  $\{e_{уc.i}\} \in E_{уc}$  выполняется формирование единой среды установления соединения, с множественным конкурентным синхронным методом доступа. Среда установления соединения позволяет каждому узлу взаимодействовать с каждым соседним узлом в условиях нестационарности среды распространения сигнала, выполнять прием и передачу кадров управления, собирать статистические данные качества принимаемых от соседних узлов сигналов и определять для каждого отношения соседства каналы передачи данных  $\{e_{пд.i}\} \in E_{пд}$ , обладающие наилучшими показателями качества.

Влияние мешающих факторов природного и искусственного происхождения, а также интерференция сигналов конкурирующих за среду узлов приводит к возникновению отказов среды установления соединения. Для формирования между соседними узлами линий передачи данных по критерию их надежности необходимо определить зависимости задержки обмена управляющими данными при выполнении процедуры установления соединения.

Для организации информационного обмена в среде установления соединения определены: алгоритм использования ресурса физических каналов  $\{e_{уc.i}\} \in E_{уc}$ , позволяющий обеспечить взаимодействие узлов в условиях низкого качества отдельных физических каналов и различий в условиях приема сигналов пространственно-разнесенных узлов; синхронный конкурентный метод доступа к среде; алгоритмы обмена данными и сбора статистических данных о качестве используемой среды.

В результате моделирования процесса установления соединения получены зависимости задержки установления соединения от интенсивности поступления запросов обмена данными, количества соседних узлов, качества физической среды и особенностей алгоритма обмена данными. Анализ полученных результатов показал, что для решения задачи формирования линии передачи данных с оптимизацией показателей надежности требуется:

- оптимизировать задержку установления соединения, применяя методы управления потоками данных, путем балансировки нагрузки в линиях передачи данных;
- повысить надежность среды установления соединения, используя методы резервирования;
- обеспечить непосредственное взаимодействие пространственно-удаленных узлов, имеющих различные условия приема сигналов в различных физических каналах.
- обеспечить относительно слабую зависимость показателей надежности среды установления соединения от качества используемой физической среды.

Подмножество каналов передачи данных  $\{e_{пд.i}\} \in E_{пд}$  используется для формирования среды передачи данных, предназначенной для организации обмена полезными данными между соседними узлами с асинхронным доступом к среде в режиме «точка-точка». Среда передачи данных формируется для каждой пары соседних узлов в каналах, обладающих наилучшими показателями качества.

Для организации информационного обмена в среде передачи данных определены: алгоритм использования ресурса физических каналов  $\{e_{пд.i}\} \in E_{пд}$ , позволяющий обеспечить взаимодействие узлов в условиях низкого качества отдельных физических каналов и различий в условиях приема сигналов пространственно-разнесенных узлов; асинхронный метод доступа к среде; алгоритм обмена полезными данными.

В результате моделирования процесса обмена данными получены зависимости времени транзакции передачи данных от качества физической среды с учетом особенностей заданного алгоритма обмена данными. Анализ полученных результатов показал, что вариативность параметров физической среды исследуемой коммуникационной системы, выраженная в изменениях вероятности потери кадра, приводит к необходимости принятия мер, нацеленных на повышение надежности процесса передачи данных, что должно быть учтено при разработке метода формирования линии передачи данных. Для решения задачи формирования линии передачи данных с оптимизацией показателей надежности требуется, используя методы резервирования, обеспечить слабую зависимость показателей надежности среды передачи данных от качества используемой физической среды.

Определение показателей качества каналов обмена данными, формирование линий передачи данных, и маршрутов доставки сообщений выполняется каждым узлом коммуникационной системы на основе отношений поддерживаемых отношений соседства с другими узлами. В результате установления отношений соседства формируется динамическая многосвязная топология исследуемой коммуникационной системы. Взаимодействие узлов исследуемой коммуникационной системы основано на разработанном протоколе установления и поддержки отношений соседства, включающем периоды выполнения обновления отношений соседства ( $T_{ООС}$ ) и рассылки объявлений Hello ( $T_{Hello}$ ). Полученные временные параметры учитывают длительности периодов квазистационарности физических каналов исследуемой коммуникационной системы и позволяют адаптировать линии передачи данных к изменяющимся условиям приема сигналов.

**В третьей главе** Разработаны алгоритм структурно-параметрического синтеза и метод оценки надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю, а также получен критерий оценки условной непрерывности информационного обмена в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией.

Исследуемая коммуникационная система имеет многосвязную самоорганизующуюся топологию, где между узлами поддерживаются отношения соседства. Маршрут от узла источника до узла назначения есть конечная последовательность линий передачи данных (рис. 1).

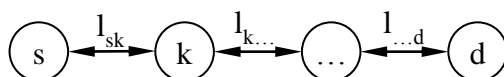


Рис.1 Конечная последовательность ребер ( $l_{s,k}, l_{k,\dots}, \dots, l_{\dots,d}$ ), составляющих маршрут доставки сообщений от узла  $s$  до узла  $d$

При диффузном методе распространения маршрутной информации любой маршрут передачи данных может быть представлен в виде:

$$R_{sd} = \{l_{sk} \cup R_{kd}\}, \quad (1)$$

где  $l_{sk}$  – линия передачи данных соседних узлов ( $s, k$ );  $R_{kd}$  – путь от узла  $k$  до узла  $d$ . Тогда, маршрут от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$  может быть представлен как нерезервированная восстанавливаемая система (рис. 2) с основным соединением элементов  $\{l_{sk}, R_{kd}\}$ .

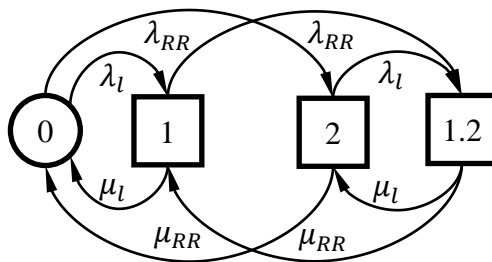


Рис. 2 Граф состояний маршрута доставки сообщений;  $\{0, 1, 2, 1.2\}$  – состояния системы – маршрут  $R_{sd}$ ;  $\lambda_l, \mu_l$  – интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных  $l_{sk}$ ;  $\lambda_{RR}, \mu_{RR}$  – интенсивности отказов и восстановлений сообщенного маршрута  $R_{kd}$

Так как непрерывность передачи информации является одним из основных параметров качества обмена данными, то в условиях нестационарности физической среды для оценки надежности маршрута  $R_{sd}$  может быть использован показатель в виде коэффициента готовности:

$$F_R = \frac{\mu_l \mu_{RR}}{(\lambda_l + \mu_l)(\lambda_{RR} + \mu_{RR})} = F_l * F_{RR} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $F_l$  – коэффициент готовности линии передачи данных  $l_{sk}$ ;  $F_{RR}$  – коэффициент готовности сообщенного маршрута  $R_{kd}$ ,  $\lambda_l, \mu_l$  – интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных  $l_{sk}$ ;  $\lambda_{RR}, \mu_{RR}$  – интенсивности отказов и восстановлений сообщенного маршрута  $R_{kd}$ . Коэффициент готовности  $F_R$  определяет вероятность исправного состояния маршрута  $R_{sd}$  и является его метрикой. Тогда, оптимальным маршрутом доставки сообщений является маршрут с наибольшим показателем коэффициента готовности. Таким образом, предложен метод оценки надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю, который позволяет

получить вероятностную характеристику исправного состояния маршрута доставки сообщений на заданном интервале времени.

Маршрут  $R_{sd}$  есть система, элементами которой являются линии передачи данных  $\{l_{ij}\}$ . Линии передачи данных  $l_{ij}$  создаются в результате установления между узлами отношений соседства. Основываясь на выводах, полученных во второй главе диссертационной работы, обмен данными между соседними узлами состоит из трех последовательных этапов: установления соединения, запроса готовности узла следующего перехода и передачи данных. Следовательно, линия передачи данных  $l_{sk}$  (рис. 1) представляет собой восстанавливаемую систему с основным соединением элементов (рис. 3).

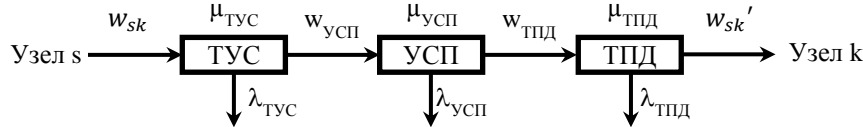


Рис. 3 – Базовая структура линии передачи данных: ТУС – трасса установления соединения; УСП – узел следующего перехода; ТПД – трасса передачи данных;  $w$  – интенсивность потока данных;  $\lambda$  – интенсивность отказов;  $\mu$  – интенсивность восстановлений

Надежность линии передачи данных определяется показателями надежности  $\lambda_{тус}, \mu_{тус}, \lambda_{усп}, \mu_{усп}, \lambda_{тпд}, \mu_{тпд}$  её элементов (ТУС, УСП, ТПД). Оптимизация показателей надежности линии передачи данных позволит формировать маршруты наибольшей надежности. Тогда, целевая функция оптимизации стационарного состояния маршрута передачи данных от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$  через узел следующего перехода  $k$  имеет следующий вид:

$$F_{R.sd} \left( F_{l.sk} \left( F_{тус}(\lambda_{тус}, \mu_{тус}); F_{усп}(\lambda_{усп}, \mu_{усп}); F_{тпд}(\lambda_{тпд}, \mu_{тпд}) \right); F_{R.kd} \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $F_{l.sk}, F_{тус}, F_{усп}, F_{тпд}$  – коэффициенты готовности: линии передачи данных, трассы установления соединения, узла следующего перехода, трассы передачи данных;  $F_{R.kd}$  – коэффициент готовности маршрута (сообщенного) от узла следующего перехода до узла назначения. Таким образом, получены условие формирования оптимального по критерию надежности маршрута доставки сообщений, а также получен критерий оценки условного расстояния от узла источника до узла назначения в пространстве параметров надежности.

Основу линий передачи данных составляют множества каналов установления соединения  $E_{уc}$  и передачи данных  $E_{пд}$ . Для формирования линий передачи данных каждый узел для каждого отношения соседства выполняет оценку надежности физических каналов. Оценка надежности принимаемых от соседних узлов сигналов выполняется на основе определения вероятности ошибки элемента сигнала  $p_{ош.}$ , определяемой при каждом приеме дискретного сообщения. Используя заданные допустимые значения вероятности ошибки элемента сигнала  $p_{ош.доп.}$ , каждым узлом для каждого отношения соседства в каждом канале среды установления соединения  $e_{уc.i} \in E_{уc}$  определяются вероятности успешного приема дискретных сообщений  $\{P_{нпдс.i}\}$ . Оценка надежности физического канала выполняется экстраполяцией последовательности  $\{P_{нпдс.i}\}$  в скользящем окне на интервале обновления отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{оос}]$ . В результате экстраполяции получена последовательность значений вероятности исправного состояния канала  $\{P_{иск.i}\}$ , позволяющих оценить надежность приема текущим узлом дискретных сообщений, передаваемых заданным соседним узлом в заданном физическом канале  $e_{уc.i} \in E_{уc}$  с заданной достоверностью. Для каждого физического канала  $e_{уc.i} \in E_{уc}$  на интервале  $[t_i, t_i + T_{оос}]$  определяются интенсивности отказов  $\lambda_{e.уc}$  и восстановлений  $\mu_{e.уc}$ , что необходимо для формирования элементов линии передачи данных.

Процедура установления соединения между соседними узлами предусматривает обмен кадрами управления в заданном канале  $e_{уc.i} \in E_{уc}$ , в соответствии с заданными правилами доступа к среде и алгоритмом обмена данными (глава 2). Тогда, для каждого отношения соседства в каждом канале  $e_{уc.i} \in E_{уc}$  формируется среда установления соединения. Нестационарность каналов  $e_{уc.i} \in E_{уc}$  является причиной возникновения периодических отказов среды при попытках передачи данных. Следовательно, среда установления соединения есть восстанавливаемая система с основным соединением элементов. Используя интенсивности отказов  $\lambda_{e.уc.i}$  и восстановлений  $\mu_{e.уc.i}$  канала  $e_{уc.i} \in E_{уc}$ , в работе получены зависимости

коэффициента готовности  $F_{СУС.i}$ , интенсивностей отказов  $\lambda_{СУС.i}$  и восстановлений  $\mu_{СУС.i}$  среды установления соединения  $СУС_i$ . Надежность  $СУС_i$  есть прогнозируемая на период  $[t_i, t_i + T_{00С}]$  вероятность успешного выполнения процедуры установления соединения между заданными соседними узлами в заданном канале  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ .

В результате математического моделирования получено, что среда установления соединения не обеспечивает требуемый уровень надежности обмена данными в условиях нестационарности каналов  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ . Для повышения надежности обмена данными необходимо использовать резервные каналы установления соединения. Тогда, при отказе  $СУС_i$  вызывающий узел выполнит повторные попытки в следующих  $i + n$  средах установления соединения. Совокупность физических каналов  $\{e_{УС.i}\} \in E_{УС}$ , обеспечивающих обмен служебными сообщениями соседних узлов (s, k), а также алгоритм использования ресурса физических каналов образуют трассу установления соединения – восстанавливаемую систему передачи данных с общим резервированием замещением, граф состояний которой показан на рис. 4.

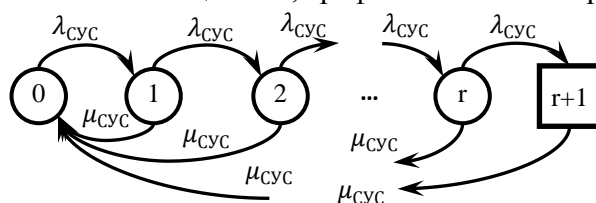


Рис. 4 Граф состояний трассы установления соединения;  $\{0, 1, \dots, r, r + 1\}$  – состояния системы;  $\lambda_{СУС}$  и  $\mu_{СУС}$  – усредненные интенсивности отказов и восстановлений среды установления соединения  $СУС$ ;  $r$  – количество повторных попыток установления соединения

На основе созданной модели, использующей интенсивности отказов  $\{\lambda_{СУС.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{СУС.i}\}$  сред установления соединения  $\{СУС_i\}$ , в работе получены зависимости коэффициента готовности  $F_{ТУС}$ , интенсивностей отказов  $\lambda_{ТУС}$  и восстановлений  $\mu_{ТУС}$  трассы установления соединения соседних узлов (s, k) при  $r$  количестве повторных попыток, где:

$$F_{ТУС} = 1 - \frac{\lambda_{СУС}^{(r+1)}}{(\lambda_{СУС} + \mu_{СУС})^{(r+1)}}. \quad (4)$$

$F_{ТУС}$  является стационарным на интервале времени  $[t_i, t_i + T_{00С}]$  и определяет вероятность исправного состояния трассы установления соединения при попытке выполнения индивидуального вызова. Анализ результатов моделирования показал, что трасса установления соединения обеспечивает обмен данными между соседними узлами с надежностью превышающей надежность обмена данными в отдельном физическом канале  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ . Надежность трассы установления соединения слабо зависит от изменений качества каналов  $E_{УС}$ .

Передача данных до узла назначения  $d$  выполняется средствами маршрутизации через узлы следующего перехода. На вход каждого узла следующего перехода с интенсивностью  $W_{УСП}$  поступают запросы обмена данными, прошедшие трассу установления соединения. Выполняя передачу данных, узел находится в занятом состоянии, отвечая отказом на последующие запросы обмена данными. Среднее время обработки запроса передачи данных узлом коммуникационной системы равно:

$$T_{ПД} = \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{i=1}^{r-1} \left[ (Q_{п.к.} + P_{п.к.} * Q_{п.к.})^i * T_{т.пд.i} \right] + T_{т.пд.j} \right], \quad (5)$$

где  $n$  – количество кадров необходимых для передачи блока данных;  $r$  – допустимое количество попыток передачи кадра;  $P_{п.к.}$  – вероятность успешной передачи кадра данных;  $Q_{п.к.} = 1 - P_{п.к.}$ ;  $T_{т.пд}$  – среднее время транзакции передачи данных. Полученная зависимость  $T_{ПД}$  позволила определить интенсивность обработки запросов передачи данных  $\mu_{ЗПД}$ , являющуюся параметром оценки надежности линии передачи данных.

Вслед за установлением соединения и запросом готовности узла следующего перехода выполняется процедура передачи данных в каналах  $E_{ПД} \in E$ , образующих на основе заданных правил доступа к среде и алгоритма обмена данными (глава 2) для каждого отношения соседства в каждом канале  $e_{ПД.i} \in E_{ПД}$  среду передачи данных. Процесс передачи данных в  $e_{ПД.i} \in E_{ПД}$  моделируется восстанавливаемой системой с резервированием замещением. На основе разработанной модели надежности и полученных интенсивностей отказов  $\lambda_{e.УС}$  и

восстановлений  $\mu_{e.ус}$  каналов  $\{e_{ус.i}\} \in E_{ус}$  определены зависимости интенсивности отказов  $\lambda_{e.пд}$  и восстановлений  $\mu_{e.пд}$  каналов передачи данных.

Анализ результатов моделирования показал, что нестационарность каналов связи приводит к низкой надежности обмена данными между узлами коммуникационной системы. Для увеличения надежности передачи данных физические каналы объединены в логическую структуру – интерфейс. Формирование интерфейса, его состав и надежность определяются узлами с периодом  $T_{оос}$ . Интерфейс представляет собой восстанавливаемую систему с резервированием методом замещения, элементы которой  $e_{и.i} \in E_{и} \in E_{пд}$  независимы по отказам и не ограничены по восстановлению (рис. 5).

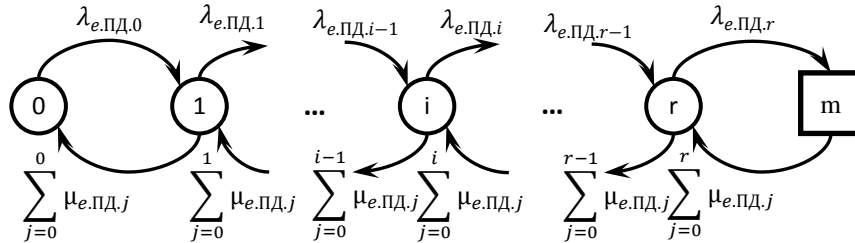


Рис. 5 Граф состояний интерфейса узла;  $\lambda_{e.и.i}$ ,  $\mu_{e.и.i}$  – интенсивности отказов и

восстановлений канала  $e_{и.i} \in E_{и}$ ;  $r$  – количество интерфейсных каналов;  $m$  – состояние отказа

Тогда, коэффициент готовности интерфейса, равен:

$$F_{и} = 1 - \frac{\prod_{i=0}^{m-1} \lambda_{e.пд.i}}{f(m)}, \quad (6)$$

где  $f(m) = \prod_{i=0}^{m-1} \lambda_{e.пд.i} + f(m-1) * \sum_{i=0}^{m-1} \mu_{e.пд.i}$ , при  $0 \leq m \leq (r+1)$ . Используя (6) получены зависимости интенсивностей отказов ( $\lambda_{и}$ ) и восстановлений ( $\mu_{и}$ ) интерфейса. Анализ результатов моделирования показал, что надежность интерфейса слабо зависит от качества отдельных каналов  $e_{пд.i} \in E_{пд}$ .

Для организации двустороннего взаимодействия соседние узлы ( $s, k$ ) используют интерфейсы ( $I_s, I_k$ ), образуя на время обмена полезными данными трассу передачи данных, которая представляет собой восстанавливаемую систему с основным соединением элементов без резервирования, в которой элементы системы независимы по отказам и не ограничены по восстановлению (рис. 6).

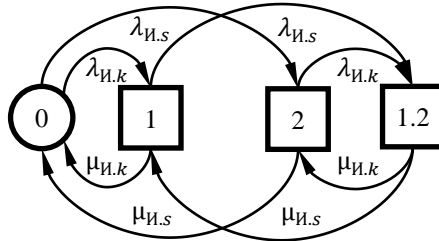


Рис. 6 Граф состояний трассы передачи данных; интенсивности отказов  $\lambda_{и.s}$ ,  $\lambda_{и.k}$  и восстановлений  $\mu_{и.s}$ ,  $\mu_{и.k}$  интерфейсов узлов ( $s, k$ );  $\{0; 1; 2; 1.2\}$  – состояния трассы передачи данных

На основе созданной модели получена зависимость коэффициента готовности трассы передачи данных узлов ( $s, k$ ):

$$F_{тпд.sk} = \frac{\mu_{и.k}\mu_{и.s}}{(\lambda_{и.k} + \mu_{и.k}) * (\lambda_{и.s} + \mu_{и.s})}. \quad (7)$$

В работе получены зависимости интенсивности отказов  $\lambda_{тпд}$  и восстановлений  $\mu_{тпд}$  трассы передачи данных. Надежность трассы передачи данных слабо зависит от качества отдельных каналов  $e_{пд.i} \in E_{пд}$ .

Таким образом, полученные зависимости интенсивностей отказов ( $\lambda_{тус}, \mu_{усп}, \lambda_{тпд}$ ) и восстановлений ( $\mu_{тус}, \mu_{усп}, \mu_{тпд}$ ) трассы установления соединения, узла следующего перехода, трассы передачи данных (соответственно) позволяют выполнить формирование линии передачи данных в соответствии с базовой структурой (рис. 3). Тогда, линия передачи данных есть восстанавливаемая система с основным соединением независимых по отказам и не ограниченных в восстановлении элементов (рис. 7).

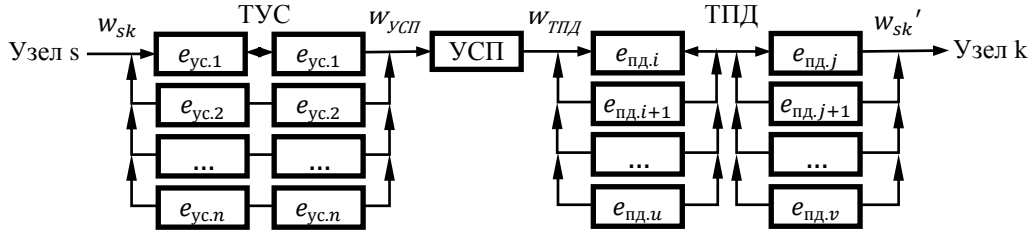


Рис. 7 Структурная схема линии передачи данных соседних узлов  $\{s, k\}$ ; ТУС – трасса установления соединения; УСП – узел следующего перехода; ТПД – трасса передачи данных;  $e_{yc}$  – физический канала установления соединения;  $e_{пд}$  – физический канала передачи данных;  $w_{sk}$  – интенсивность потока данных от узла  $s$  до узла  $k$ ;  $w_{усп}$  – интенсивность потока запросов готовности узла следующего перехода;  $w_{ТПД}$  – интенсивность потока обращений к трассе передачи данных

На основе разработанной модели, получена зависимость коэффициента готовности линии передачи данных в стационарном режиме:

$$F_{ЛПД} = \frac{\mu_{ТУС}\mu_{УСП}\mu_{ТПД} * (\lambda_{УСП} + \mu_{ТУС}) * (\lambda_{УСП} + \lambda_{ТПД} + \mu_{ТУС})}{(\lambda_{ТУС} + \mu_{ТУС}) * (\lambda_{ТУС}\lambda_{УСП} + (\lambda_{УСП} + \mu_{ТУС}) * (\lambda_{УСП} + \mu_{УСП})) * (\lambda_{ТУС}\lambda_{ТПД} + (\lambda_{УСП} + \lambda_{ТПД} + \mu_{ТУС}) * (\lambda_{ТПД} + \mu_{ТПД}))}, \quad (8)$$

где –  $(\lambda_{ТУС}, \lambda_{УСП}, \lambda_{ТПД})$  интенсивности отказов,  $(\mu_{ТУС}, \mu_{УСП}, \mu_{ТПД})$  интенсивности восстановлений трассы установления соединения, узла следующего перехода, трассы передачи данных соответственно. На основе (8) получены зависимости для интенсивностей отказов  $\lambda_{ЛПД}$  и восстановлений  $\mu_{ЛПД}$  линии передачи данных.

В результате структурного синтеза в диссертационной работе получена иерархическая структура элементов, составляющих систему-маршрут доставки сообщений. Для каждого элемента в результате параметрического синтеза определены параметры надежности. Таким образом, в результате структурно-параметрического синтеза получено пространство параметров надежности иерархически взаимосвязанных элементов, составляющих маршрут доставки сообщений. На основе пространства параметров надежности элементов получен коэффициент готовности маршрута доставки сообщений, используемый в качестве критерия условной непрерывности информационного обмена в коммуникационной системе с нестационарной топологией.

Таким образом, методом декомпозиции были определены элементы, составляющие линию передачи данных. На основе разработанных моделей надежности выполнено формирование линии передачи данных с учетом особенностей физической среды исследуемой коммуникационной системы. Получены зависимости показателей надежности линии передачи данных, необходимых для формирования маршрутов доставки сообщений по критерию надежности. В результате структурно-параметрического синтеза и блочно-иерархического метода получены структурная схема, алгоритм работы и синтезированы параметры линии передачи данных, обеспечивающей непосредственное взаимодействие соседних узлов с надежностью, превышающей надежность взаимодействия в отдельном канале связи. Так, показатель коэффициента готовности линии передачи данных составил  $F_{ЛПД} = 0.59$  при количестве используемых резервных каналов трассы установления соединения и интерфейсов  $n_{ТУС} = 4$  и  $n_{ПД} = 4$  соответственно интенсивности поступления запросов готовности узла следующего перехода  $w_{УСП} = 0.01$ . При этом коэффициент готовности линии передачи данных с одним используемым каналом составил  $F_{ЛПД} = 0.2$  при том же значении  $w_{УСП} = 0.01$ .

**В четвертой главе** представлена разработанная имитационная модель исследуемой коммуникационной системы, предназначенная для оценки эффективности синтезированных в диссертационной работе схем, алгоритмов и методов, обеспечивающих формирование оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией.

Для выполнения имитационного моделирования была разработана и реализована модель исследуемой коммуникационной системы т.н. «Эстафета», реализованная в системе дискретного моделирования событий “OMNeT++”. В имитационной модели были реализованы: нестационарные каналы связи, имитирующие ДКМ диапазон частот, протоколы и алгоритмы, обеспечивающие взаимодействие между соседними узлами в средах установления соединения и передачи данных (глава 2), методы и алгоритмы формирования линии передачи данных и её элементов с оптимизацией по критерию готовности (глава 3).

В ходе имитационного моделирования была выполнена серия экспериментов длительностью  $T_{exp} = 10^4$ с. каждый, нацеленных на формирование между соседними узлами линий передачи данных, при следующих условиях: количество узлов – 4, расстояние между узлами – 150км (212км), количество каналов  $E_{yc}$  – 8, количество каналов  $E_{пд}$  – 8, мощность передатчика – 2000мВт, значение допустимой ошибки элемента сигнала –  $10^{-3}$ .

В ходе обмена данными каждый узел коммуникационной системы выполнял сбор статистических данных качества, принимаемых от соседних узлов, сигналов. В результате каждым узлом  $n_i \in N$  для каждого отношения соседства в каждом канале  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  получены вероятности исправного состояния каналов  $\{P_{иски}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{e_{yc.i}}\}$  и восстановления  $\{\mu_{e_{yc.i}}\}$ , прогнозируемые для каждого периода обновления отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{00c}]$ .

В соответствии с разработанными методами на основе полученных интенсивностей отказов  $\{\lambda_{e_{yc.i}}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{e_{yc.i}}\}$  каналов  $\{e_{yc.i} \in E_{yc}\}$  каждым узлом для каждого отношения соседства сформированы среды установления соединения и получены показатели их надежности: коэффициенты готовности  $\{F_{сус.i}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{сус.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{сус.i}\}$ .

Это позволило каждому узлу для каждого отношения соседства сформировать трассы установления соединения и определить показатели их надежности. На рис. 8.и показана зависимость коэффициента готовности трассы установления соединения узлов  $\{n0, n1\}$ , полученная в ходе имитационного моделирования длительностью  $T_{exp} = 10^4$ с, где средние значения коэффициентов готовности составили:

- $\overline{F_{сус.i}} = \{0.79; 0.66; 0.59; 0.87; 0.79; 0.75; 0.75; 0.89\}$  при  $\sigma_{F.сус.i} = \{0.30; 0.25; 0.43; 0.13; 0.15; 0.27; 0.27; 0.16\}$ , где  $i = 1, 2, \dots, 8$  – номер канала  $e_{yc.i} \in E_{yc}$ ;
- $\overline{F_{тус.01.r}} = \{0.76; 0.91; 0.96; 0.98; 0.98; 0.98; 0.95; 0.88\}$  при  $\sigma_{F.тус.01.r} = \{0.11; 0.08; 0.06; 0.04; 0.03; 0.12; 0.20; 0.33\}$ , где  $r = 1, 2, \dots, 8$  – количество попыток (каналов).

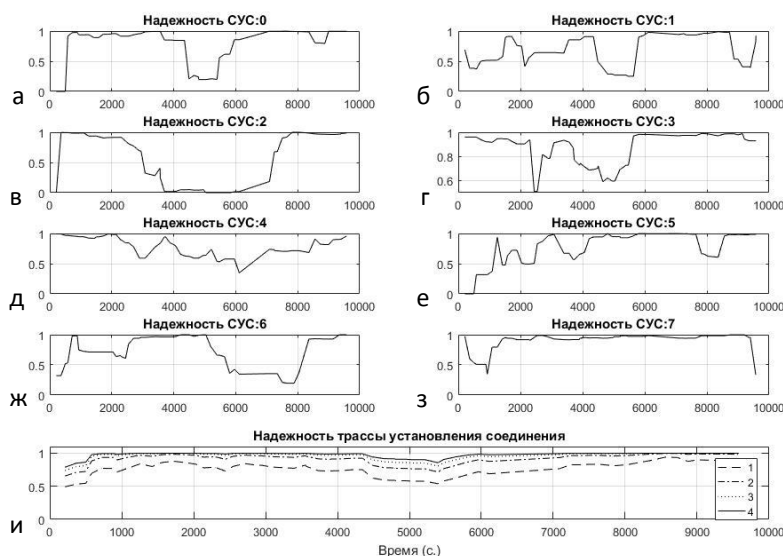


Рис. 8 Коэффициент готовности трассы установления соединения узлов  $\{n0, n1\}$ : (и); количество повторных попыток: 1, 2, 3, 4 (и: 1, 2, 3, 4); (а-з): надежности сред установления соединения  $\{СУС_{0-7}\}$



На примере взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  показано, что надежность трассы установления соединения превышает надежности отдельных сред установления соединения  $\{СУС_{0-7}\}$ . Получены значения интенсивности отказов  $\{\lambda_{ТУС.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{ТУС.i}\}$  ТУС.

При имитационном моделировании готовность узла следующего перехода определялась на основе анализа статистических данных о количестве поступивших, обработанных и отказанных запросов передачи данных в каждом периоде обновления отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{ООС}]$ . На рис. 9 зависимостями 1, 2, 3 показаны изменения коэффициентов готовности  $F_{УСП}$  узлов следующего перехода:  $n1, n2, n3$ , определенные узлом  $n0$  при изменениях интенсивностей поступления запросов передачи данных  $w_{зпд}$ .

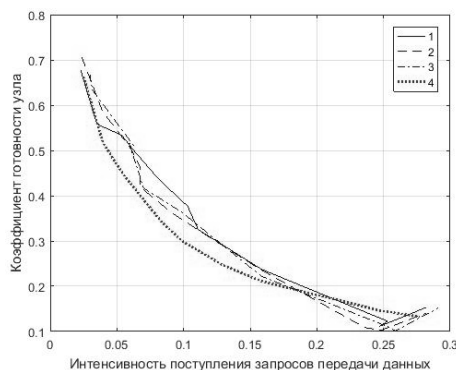


Рис. 9 Коэффициент готовности УСП:  $n1$  (1),  $n2$  (2),  $n3$  (3), определенный узлом  $n0$ ; (4) - коэффициент готовности узла следующего перехода, полученный в ходе математического моделирования

Максимальное значение  $w_{зпд}$ , достигнутое в ходе экспериментов, составило  $w_{зпд} \leq 0.3$ . Дальнейшее увеличение  $w_{зпд}$  ограничено ростом конфликтов в среде установления соединения. Наблюдаются скачкообразные изменения коэффициентов готовности при  $w_{зпд} \approx 0.25$ , что объясняется нестабильным поведением среды установления соединения при большом количестве конфликтов. Получены значения коэффициентов готовности ( $F_{УСП}$ ) интенсивностей восстановлений ( $\mu_{зпд}$ ) узлов следующего перехода. Так,  $F_{УСП.01} = 0.66$  при  $w_{зпд} = 0.03$ ;  $F_{УСП.01} = 0.16$  при  $w_{зпд} = 0.28$ .

На основе полученных в ходе имитационного моделирования показателей интенсивностей отказов  $\{\lambda_{e.пд.i}\}$  и восстановлений и восстановления  $\{\mu_{e.пд.i}\}$  физических каналов  $\{e_{пд.i}\} \in E_{пд}$  для каждого отношения соседства узлами формировались интерфейсы. Применение интерфейсов позволило создать слабо зависимую от физической среды систему передачи данных. На примере взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  среднее значение коэффициента готовности интерфейса полученное в ходе работы модели составило  $\overline{F_{и.01}} = 0,99$  при  $\sigma_{и.01} = 0,003$ . Для каждого интерфейса получены показатели интенсивностей отказов  $\lambda_{и}$  и восстановлений  $\mu_{и}$  для каждого периода обновлений отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{ООС}]$ .

Каждым узлом имитационной модели на основе интерфейсов для каждой пары соседних узлов формировались трассы передачи данных. В соответствии с разработанной моделью надежности для определения надежности трасс использовались полученные интенсивности отказов  $\{\lambda_{и.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{и.i}\}$  интерфейсов. На примере отношений соседства узлов  $\{n0, n1\}$  получен коэффициент готовности трассы передачи данных  $F_{Тпд.01}$  (рис. 10).

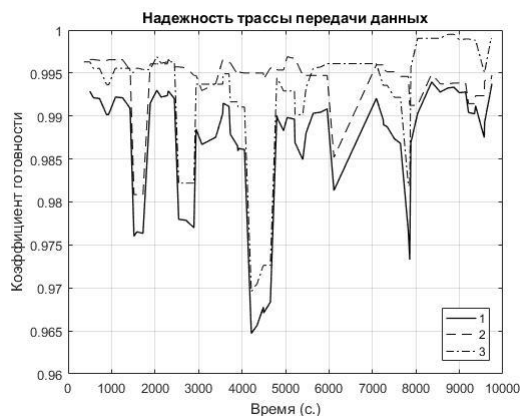


Рис. 10 Коэффициент готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД},01}$  (1); коэффициенты готовности интерфейсов  $F_{\text{И},01}, F_{\text{И},10}$  узлов  $n0, n1$  (2, 3)

Надежность трассы передачи данных значительно превышает надежность физических каналов  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$ . Так, среднее значение коэффициента готовности составило  $\overline{F_{\text{ТПД},01}} = 0,99$  при  $\sigma_{\text{ТПД},01} = 0,007$ . Средние вероятности исправного состояния каналов ПД (0 – 7) составили:

$\overline{F_{e,\text{ПД},i}} = \{0,88; 0,84; 0,89; 0,91; 0,90; 0,84; 0,83; 0,81\}$  при  $\sigma_{F,e,\text{ПД},i} = \{0,12; 0,11; 0,06; 0,04; 0,05; 0,16; 0,14; 0,16\}$ , где  $i = 1, 2, \dots, 8$  – номер канала  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$ . Полученные результаты демонстрируют слабую зависимость надежности трассы передачи данных от изменений качества физических каналов, входящих в состав интерфейсов. Полученные результаты моделирования позволяют расценивать трассу передачи данных как квазистационарную систему на интервале моделирования  $T_{\text{exp}} = 10^4$ . Для каждой трассы передачи данных получены показатели интенсивностей отказов  $\lambda_{\text{ТПД}}$  и восстановлений  $\mu_{\text{ТПД}}$  для каждого периода обновлений отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{\text{ООС}}]$ .

В соответствии с разработанным методом каждым узлом для каждого отношения соседства сформированы линии передачи данных. Так в ходе взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  была сформирована линия передачи данных  $l_{01}$ . В ходе имитационного моделирования в течение  $T_{\text{exp}} = 10^4$  с. для каждого периода обновления отношений соседства узлом  $n0$  выполнялось определение коэффициента готовности  $F_{\text{ЛПД},01}$  линии передачи данных  $l_{01}$  с узлом  $n1$ . На рис. 11 в показана зависимость коэффициента готовности линии передачи данных  $F_{\text{Л},01}$  узлов  $\{n0, n1\}$  от надежности её элементов:  $F_{\text{ТУС},01}(\lambda_{\text{ТУС},01}, \mu_{\text{ТУС},01})$ ;  $F_{\text{УСП},1}(\lambda_{\text{УСП},1}, \mu_{\text{УСП},1})$ ;  $F_{\text{ТПД},01}(\lambda_{\text{ТПД},01}, \mu_{\text{ТПД},01})$ .

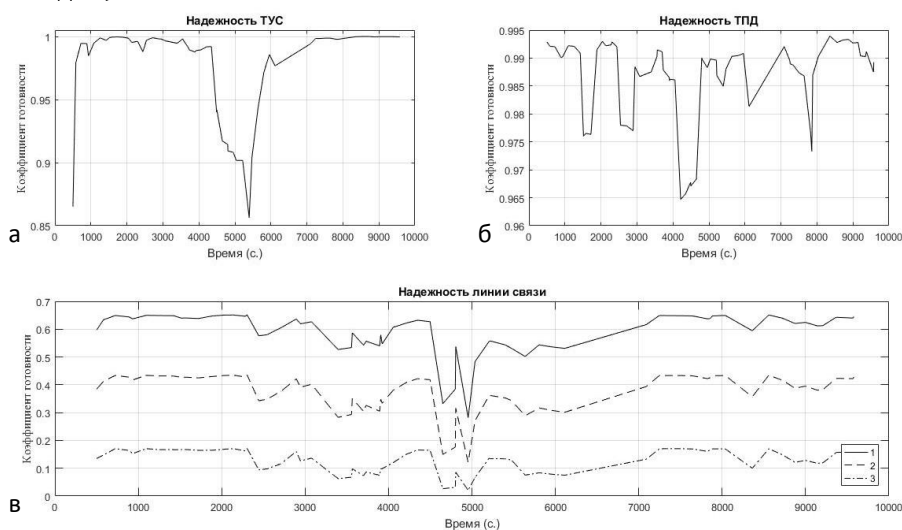


Рис. 11 Коэффициент готовности линии передачи данных узлов  $\{n0, n1\}$  (в), где коэффициент готовности узла следующего перехода  $F_{\text{УСП},1} = 0,6579$  (в: 1); 0,4403 (в: 2); 0,1081 (в: 3); (а) – коэффициент готовности трассы установления соединения  $F_{\text{ТУС},01}$ ; (б) – коэффициент готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД},01}$

В результате моделирования получено, что среднее значение коэффициент готовности линии передачи данных составило:  $\overline{F_{Л.01}} = 0,60$ ;  $\sigma_{Л.01} = 0,07$  при  $\overline{F_{ТУС.01}} = 0,98$ ;  $F_{УСП.1} = 0,66$ ;  $\overline{F_{ТПД.01}} = 0,99$ . Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: линия передачи данных позволяет снизить влияние отдельных физических каналов на надежность и непрерывность информационного обмена; надежность линии передачи данных слабо зависит от нестационарности физических каналов, различий в условиях приема сигналов пространственно-разнесенных узлов. Наибольшее влияние на величину надежности линии передачи данных оказывает надежность узла следующего перехода. Для каждой линии передачи данных получены показатели интенсивностей отказов  $\lambda_{ЛПД}$  и восстановлений  $\mu_{ЛПД}$  для каждого периода обновлений отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{ООС}]$ .

Полученные оценки надежности линий передачи данных позволили сформировать маршруты, оптимизируя их по критерию надежности (рис. 12). Так, в соответствии с принятой моделью для передачи данных от узла источника  $n0$  до узла назначения  $nd$  были получены значения метрики возможных маршрутов доставки сообщений:  $F_{R.01d} = 0,24$ ,  $F_{R.02d} = 0,13$  и  $F_{R.03d} = 0,17$ , где  $\{n1, n2, n3\}$  узлы следующего перехода.

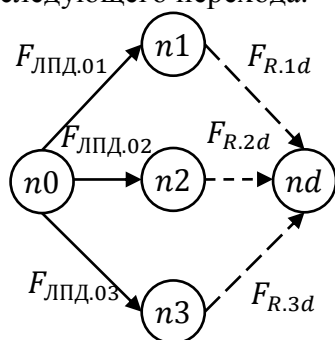


Рис. 12 Топология коммуникационной системы, определенная узлом  $n0$  по средствам обмена информацией с соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$ , где  $nd$  – узел назначения;  $F_{Л.0i}$  – коэффициент готовности линии передачи данных  $l_{0i}$ ;  $F_{R.0id}$  – коэффициент готовности сообщенного маршрута до узла назначения  $nd$

В результате оценки полученных показателей метрик возможных маршрутов по критерию надежности установлено, что передача данных от узла источника  $n0$  до узла назначения  $nd$  выполняется по маршруту с наилучшим показателем коэффициента готовности маршрута  $F_{R.01d} = 0,24$ , где  $n1$  – узел следующего перехода. Маршруты с показателями коэффициентов готовности  $F_{R.02d} = 0,13$  и  $F_{R.03d} = 0,17$ , проходящие через узлы  $\{n2, n3\}$ , являются альтернативными.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

**В приложениях** приведены: форматы кадров принятых протоколов установления соединения и передачи данных, временные параметры протоколов установления соединения и передачи данных, численные результаты (коэффициенты готовности, интенсивности отказов и восстановлений, и т.п.) математического и имитационного моделирования элементов коммуникационной системы: физических каналов, сред установления соединения и передачи данных, трасс установления соединения, узлов следующего перехода, интерфейсов, трасс передачи данных, линий передачи данных, полученные при различных условиях функционирования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Представленная диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи – формирования оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений конечному абоненту в коммуникационной системе, действующей в условиях влияния мешающих факторов природного и искусственного происхождения, наличия кратковременных и длительных замираний носителя информации, отсутствия подготовленной выделенной инфраструктуры управления информационными потоками. В ходе диссертационного исследования получены следующие результаты:

1. Выполнена идентификация элементов исследуемой коммуникационной системы. Анализ особенностей среды информационного обмена показал, что каналы связи, являются нестационарными в виду значительных случайных изменений показателей качества. Установлена, необходимость функционального разделения каналов связи для выполнения этапов непосредственного обмена данными. При отсутствии непосредственного взаимодействия доставка сообщений выполняется ретрансляцией пакетов данных по маршрутам до узла назначения. Установлено, что для определения надежности канала связи необходима прогнозируемая вероятностная оценка исправного состояния на заданном интервале времени. В результате анализа определено, что: для организации непосредственного обмена данными в условиях нестационарности каналов связи необходимо формирование сред с различными свойствами, методами доступа и алгоритмами, обеспечивающих выполнение этапов процесса передачи данных. В результате анализа установлено, что исследуемая коммуникационная система действует в условиях отсутствия выделенной инфраструктуры управления информационными потоками. Каждый узел функционально автономен и самостоятельно формирует линии передачи данных и определяет маршруты доставки сообщений. Коммуникационная система имеет самоорганизующуюся многосвязную нестационарную топологию. Для минимизации времени на принятие решения о доставке сообщения каждый узел проактивным методом формирует таблицу маршрутов до известных узлов назначения. Распространение информации о топологии коммуникационной системы целесообразно выполнять диффузным способом. В результате исследования определено, что формирование маршрутов в коммуникационной системе с нестационарной топологией должно выполняться по критерию надежности, который представляет собой агрегированную оценку, полученную в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений. В качестве критерия оценки надежности маршрута доставки сообщений целесообразно использовать коэффициент готовности.
2. Выполнено исследование процессов обмена данными в условиях нестационарности среды распространения сигналов. В результате анализа непосредственного взаимодействия узлов получено, что процесс обмена данными состоит из трех этапов: установление соединения, запрос готовности узла следующего перехода, передача данных. Определены множества каналов установления соединения и передачи данных и алгоритмы их использования. Синтезирована структура узла исследуемой коммуникационной системы, обеспечивающая: формирование сред установления соединения и передачи данных, выполнение процессов обмена данными, оценку качества принимаемых сигналов, поддержку отношений соседства. Идентифицированы основные параметры взаимодействия узлов в среде установления соединения: время активности канала, длительность слота канала, количество слотов, длительность передачи кадра. Определена зависимость длительности выполнения транзакции установления соединения от параметров принятого алгоритма обмена данными и качества среды обмена данными. Идентифицированы основные параметры взаимодействия узлов в среде передачи данных: длительность передачи кадров данных и управления, время транзакции передачи кадра данных. Максимальное время передачи данных определяется размером передаваемого блока данных, количеством допустимых попыток подготовки и передачи данных. Идентифицированы основные параметры взаимодействия узлов в ходе установления и поддержки отношений соседства: период рассылки объявлений узла, период повторного измерения качества канала, период достоверности оценки качества канала, период обновления отношений соседства.
3. В результате структурно-параметрического синтеза получено, что маршрут доставки сообщений есть восстанавливаемая система с последовательным соединением двух элементов: линии передачи данных, соединяющей узел источника с узлом следующего перехода, и маршрута передачи данных до узла назначения, сообщенного узлом следующего перехода. Значение метрики маршрута определяется показателем его коэффициента готовности. Синтезированы параметры маршрута доставки сообщений: интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных и коэффициент

готовности сообщенного маршрута. Получена целевая функция для формирования оптимального по критерию надежности маршрута доставки сообщений. На основе блочно-иерархического метода получена базовая структура линии передачи данных, определены её основные элементы: трасса установления соединения, узел следующего перехода, трасса передачи данных. Идентифицированы параметры надежности линии передачи данных и её элементов: коэффициенты готовности, интенсивности отказов и восстановлений. Определен метод оценки надежности канала связи на основе сбора и обработки статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов. Идентифицированы параметры оценки качества каналов связи: вероятность исправного состояния канала, интенсивности отказов и восстановлений, прогнозируемые на период обновления отношений соседства. В результате структурно-параметрического синтеза трассы установления соединения разработаны и синтезированы: модель надежности среды установления соединения, являющейся элементом трассы установления соединения; параметры среды установления соединения: интенсивности отказов и восстановлений; модель надежности трассы установления соединения, где трасса установления соединения есть восстанавливаемая система с резервированием методом замещения; параметры трассы установления соединения: интенсивности отказов и восстановлений. В результате математического моделирования получено, что трасса установления соединения обеспечивает командное взаимодействие с заданным соседним узлом с надежностью, превышающей надежность среды установления соединения. Так, среднее значение коэффициента готовности трассы установления соединения, состоящей из четырех сред установления соединения, составило 0.74 (среднеквадратическое отклонение 0.18) при среднем значении надежности среды установления соединения: 0.32 (среднеквадратическое отклонение 0.16). Синтезированы параметры надежности узла следующего перехода: интенсивности отказов и восстановлений. В результате структурно-параметрического синтеза трассы передачи данных разработаны и синтезированы:

- модель надежности интерфейса узла, где интерфейс есть восстанавливаемая система с резервированием методом замещения;
- параметры интерфейса: интенсивности отказов и восстановлений;
- модель надежности трассы передачи данных, как восстанавливаемой системы с последовательным соединением элементов – интерфейсов узлов;
- параметры надежности трассы передачи данных: интенсивности отказов и восстановлений.

В результате моделирования получено среднее значение коэффициента готовности трассы передачи данных 0.91 (среднеквадратическое отклонение 0.09) тогда как, среднее значение коэффициента готовности канала передачи данных получено равным (0.5; 0.66; 0.78; 0.8) при соответствующем количестве попыток передачи кадра данных (1, 2, 3, 4). В результате структурно-параметрического синтеза линии передачи данных в пространстве параметров надежности разработана модель надежности линии передачи данных, как восстанавливаемой системы с последовательным соединением элементов и синтезированы параметры надежности линии передачи данных: интенсивности отказов и восстановлений.

4. Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза системы доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с нестационарной топологией, позволяющий в условиях нестационарности каналов связи формировать маршруты передачи данных оптимизированные по критерию надежности.
5. Разработан метод, позволяющий на основе информации о качестве каналов связи, структурно-параметрическом синтезе и агрегировании качественных показателей элементов получить оценку надежности системы – маршрута доставки сообщений конечному получателю, характеризующую условное расстояние от узла источника до узла назначения в коммуникационной системе с нестационарной топологией.
6. В результате структурно-параметрического синтеза получен критерий оценки условной непрерывности информационного обмена – коэффициент готовности, определяемый в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки

сообщений конечному получателю. Полученный критерий позволяет оценить вероятность исправного состояния сформированного маршрута доставки сообщений в коммуникационной системе с нестационарной топологией.

7. Разработана имитационная модель исследуемой коммуникационной системы т.н. «Эстафета», предназначенная для оценки эффективности созданных алгоритмов и методов, обеспечивающих формирование оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационной системе с нестационарной топологией. Полученные результаты показывают, что:
- применение разработанного метода структурно-параметрического синтеза линий передачи данных позволило каждому узлу для каждого отношения соседства формировать линии передачи данных, оптимизированные по показателям надежности;
  - на примере взаимодействия узлов  $\{n_0, n_1\}$  получено, что, линия передачи данных оставалась в исправном состоянии в течении 95% времени работы модели при 71% времени исправного состояния среды установления соединения  $SUC_2$ , входящей в состав линии передачи данных;
  - в результате применения разработанных методов каждым узлом коммуникационной системы сформированы возможные маршруты доставки сообщений конечным абонентам и получены оценки их надежности;
  - на примере взаимодействия узлов  $\{n_0, n_1, n_2, n_3\}$  сформированы вероятные маршруты доставки сообщений от узла источника  $n_0$  до узла назначения  $nd$  через промежуточные узлы  $\{n_1, n_2, n_3\}$ , получены оценки надежности возможных маршрутов доставки сообщений  $\{0.24; 0.13; 0.17\}$  соответственно, определен основной и альтернативные маршруты доставки сообщений узлу  $nd$ .
  - оценка надежности маршрутов доставки сообщений выполнялась на основе разработанного критерия надежности – коэффициента готовности, позволяющего оценить условную непрерывность информационного обмена при передаче пакетов данных от узла источника до узла назначения.
- В результате выбора определены основной и альтернативные маршруты доставки сообщений конечным абонентам в коммуникационной системе с нестационарной топологией.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы.**

Использовать методы машинного обучения для формирования прогнозируемых оценок надежности линий передачи данных.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых журналах из списка ВАК**

1. Меркушев О.В. Структура канального уровня имитационной модели станции радиосети передачи данных/ И.З. Климов// Вестник ИжГТУ, Ижевск - 2008. - №4. - с. 115-107. (авторский вклад 80 %)
2. Меркушев О.В. Определение правил доступа к среде радиосети КВ – диапазона на этапе установления соединения/И.З. Климов// Вестник ИжГТУ, Ижевск – 2009. - №2. – с.107-109.
3. Меркушев О.В. Определение времени передачи сообщений контроля топологии между соседними узлами зонной ДКМ-радиосети/ И.З. Климов// Вестник ИжГТУ, Ижевск – 2011. - №3. – с.119-122.

### **В других изданиях**

4. Меркушев О.В. Сеть с радиодоступом в декаметровом диапазоне волн/ И.З. Климов, А.М. Чувашов// Труды VI международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Казань – 2007. – с.332.
5. Меркушев О.В. Процесс определения топологии радиосети передачи данных в декаметровом диапазоне частот// Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. – 2008. – №1. – с.139-154.

6. Меркушев О.В. Проектирование радиосети передачи данных в ненадежных каналах связи/ И.З. Климов// Сборник материалов международной научно-практической конференции «Результативная инновационная деятельность как фактор обеспечения национальной безопасности», Ижевск – 2010. – с.107-111.
7. Меркушев О.В. Маршрутизация трафика в ненадежных каналах связи/ И.З. Климов// Межвузовский научный сборник «Вычислительная техника и новые информационные технологии», Уфа – 2011. – №7. – с.149-153.
8. Меркушев О.В. Метод определения маршрутов передачи пакетов в радиосети с ненадежными каналами связи/ И.З. Климов// Сборник докладов 2-й международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электроника и связь. РЭиС-2013», Омск – 2013. – с.139-146.
9. Меркушев О.В. Моделирование процесса установления соединения узлами радиосети передачи данных в ненадежных каналах связи/ И.З. Климов// доклады 15-ой международной конференции DSPA-2013, Серия: цифровая обработка сигналов и ее применение (выпуск XV-1/2). Российское научно-техническое общество радиотехники, электротехники и связи имени А.С. Попова, Москва – 2013. т.1 – с.166-169.
10. Меркушев О.В. Метод маршрутизации пакетов в радиосети передачи данных с ненадежными каналами связи/ И.З. Климов// Сборник докладов научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2013) и НПФ «Саквояж» - 2013.
11. Меркушев О.В. Определение методов оценки надежности доставки информации конечному получателю в радиосети с нестационарными каналами связи/ И.З. Климов// Сборник докладов международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электроника и связь. РЭиС-2015», Омск – 2015. – с.86-95.
12. Меркушев О.В. Оценка надежности интерфейса сетевого узла радиосети с нестационарными каналами связи/ И.З. Климов// Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. – 2016. – т.26. №6. – с.162-168.
13. Меркушев О.В. Оценка надежности сетевого узла сети с радиодоступом в ненадежных каналах связи/ О.В. Меркушев // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. – 2017. – т.27. №1. – с.106-105.
14. Меркушев, О.В. Модель среды установления соединения системы передачи данных с ненадежными физическими каналами/ О.В. Меркушев, И.З. Климов// Интеллектуальные системы в производстве, Ижевск – 2019. - том 17, №2.
15. Меркушев, О.В. Модель надежности маршрутизации данных в распределенной системе с ненадежными физическими каналами/ О.В. Меркушев// «Вестник ИжГТУ», Ижевск - 2019. - том 22, № 2.