

ФГБОУ ВО ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.Т. КАЛАШНИКОВА

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)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Климов Игорь Зенонович

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИССЛЕДУЕМОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	15
1.1. Анализ особенностей среды распространения носителей информации .....	15
1.2. Идентификация параметров качества среды распространения носителей информации	18
1.3. Анализ методов и алгоритмов непосредственного взаимодействия узлов исследуемой коммуникационной системы .....	21
1.4. Анализ топологии и методов формирования маршрутов доставки сообщений .....	26
1.5. Исследование существующих критериев оценки надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационных системах с потерями .....	31
1.6. Выводы по главе .....	38
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБМЕНА ДАННЫМИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ .....	40
2.1. Анализ процесса обмена данными при непосредственном взаимодействии узлов.....	40
2.2. Синтез структуры узла исследуемой коммуникационной системы.....	42
2.3. Идентификация параметров взаимодействия узлов в нестационарной среде установления соединения .....	45
2.4. Идентификация параметров взаимодействия узлов в нестационарной среде передачи данных .....	56
2.4.1. Анализ процедуры подготовки передачи данных .....	56
2.4.2. Анализ процедуры передачи данных .....	60
2.5. Идентификация параметров взаимодействия узлов в ходе установления и поддержки отношений соседства .....	64
2.6. Выводы по главе 2 .....	67
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ.....	69
3.1. Структурно-параметрический синтез маршрута доставки сообщений в пространстве параметров надежности .....	69

3.2.	Идентификация параметров надежности линии передачи данных .....	75
3.3.	Метод оценки надежности канала связи .....	80
3.4.	Структурно-параметрический синтез трассы установления соединения в пространстве параметров надежности .....	85
3.4.1.	Разработка модели надежности среды установления соединения.....	85
3.4.2.	Разработка модели надежности трассы установления соединения .....	92
3.5.	Идентификация параметров надежности узла следующего перехода .....	99
3.6.	Структурно-параметрический синтез трассы передачи данных в пространстве параметров надежности .....	102
3.6.1.	Разработка модели надежности интерфейса узла.....	103
3.6.2.	Разработка модели надежности трассы передачи данных.....	113
3.7.	Структурно-параметрический синтез линии передачи данных в пространстве параметров надежности .....	119
3.8.	Выводы по главе 3 .....	130
<b>ГЛАВА 4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В ИССЛЕДУЕМОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ .....</b>		<b>134</b>
4.1.	Разработка имитационной модели исследуемой коммуникационной системы .....	134
4.2.	Анализ показателей надежности каналов связи коммуникационной системы .....	138
4.3.	Формирование трассы установления соединения .....	142
4.3.1.	Исследование показателей надежности среды установления соединения .....	143
4.3.2.	Анализ показателей надежности трассы установления соединения .....	146
4.4.	Анализ показателей надежности узла следующего перехода.....	148
4.5.	Формирование трассы передачи данных .....	152
4.5.1.	Исследование показателей надежности интерфейса узла .....	153
4.5.2.	Анализ показателей надежности трассы передачи данных.....	155
4.6.	Формирование линии передачи данных и анализ показателей её надежности.....	158
4.7.	Определение основного и альтернативных маршрутов доставки сообщений, оптимизированных по критерию надежности .....	161

4.8. Выводы по главе 4 .....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	169
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	180
СПИСОК ИЛЛЮСТРИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА .....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	192
А.1 Формат кадра протокола установления соединения .....	192
А.2 Результаты математического моделирования процесса установления соединения .....	192
А.3 Формат управляющего кадра протокола передачи данных.....	193
А.4 Базовые характеристики среды передачи данных .....	194
А.5 Результаты математического моделирования процесса подготовки передачи данных	194
А.6 Длительность кадра данных.....	195
А.7 Результаты математического моделирования процесса передачи данных .....	195
А.8 Параметры обновления отношений соседства.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	197
Б.1 Численные результаты моделирования надежности физического канала.....	197
Б.2 Численные результаты математического моделирования доступа к среде установления соединения.....	202
Б.3 Численные результаты математического моделирования надежности трассы установления соединения.....	205
Б.4 Численные результаты математического моделирования надежности узла следующего перехода .....	216
Б.5 Численные результаты математического моделирования надежности физического канала .....	217
Б.6 Численные результаты математического моделирования надежности интерфейса узла .....	224
Б.7 Численные результаты математического моделирования надежности трассы передачи данных.....	230

Б.8 Численные результаты математического моделирования надежности линии передачи данных.....	237
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	246
В.1 Основные характеристики абонентского узла .....	246
В.2 Численные результаты имитационного моделирования надежности физического канала .....	247
В.3 Численные результаты имитационного моделирования надежности среды установления соединения.....	249
В.4 Численные результаты имитационного моделирования надежности трассы установления соединения.....	255
В.5 Численные результаты имитационного моделирования надежности узла следующего перехода .....	258
В.6 Численные результаты оценки надежности интерфейса узла .....	261
В.7 Численные результаты оценки надежности трассы передачи данных .....	264
В.8 Численные результаты имитационного моделирования оценки надежности линии передачи данных .....	265

## ВВЕДЕНИЕ

**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 системы 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., Всехсвятская 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: Вишневецкий 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: Вишневецкий 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., Иыуду К.А. и др.

При определении путей доставки сообщений в условиях многосвязной топологии потенциально поддерживается множество вероятных маршрутов передачи данных. Для определение 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 ценность 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 экспериментам.

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 «Саквоее» - 2013;
- II международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электроника и связь. РЭС-2013», Омск – 2013;
- Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электроника и связь. РЭС-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.

## **ГЛАВА 1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИССЛЕДУЕМОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

### **1.1. Анализ особенностей среды распространения носителей информации**

Установлено, что качество сигналов, передаваемых в каналах связи исследуемой коммуникационной системы постоянно меняется во времени. Влияние нестационарности физических каналов на качество информационного обмена особенно ярко проявляется в системах передачи данных на дальние и сверхдальние расстояния. Подобные системы применяются для организации внутреннего, международного, зонового, подвижного информационного обмена общего и ведомственного пользования. Свойства физических каналов таких систем постоянно меняется во времени и различаются для аналогичных линий передачи данных пространственно-разнесенных узлов. Данное свойство физических каналов обуславливается временными и пространственными флуктуациями (регулярными и нерегулярными) параметров физической среды [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10].

На приемные тракты узлов действуют помехи, вызванные: атмосферными разрядами; излучением радиоустройств, работающих в соседних физических каналах; промышленными электроустановками, создающими промышленные помехи; загруженностью среды большим количеством передающих устройств, создающие сосредоточенные помехи и т.п. Помехи на входе приемника по времени и по диапазону частот являются случайными процессами, характеризующиеся в большинстве случаев нормальным законом распределения уровней помех и экспоненциальным законом распределения временных интервалов. Возникновение помех и их уровни зависят от многих факторов: географического местоположения пункта приема, физического канала, ионизации среды распространения, времени суток, сезона, фазы солнечной активности и т.п. [1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9,10].

Процесс распространения сигнала в физической среде, исследуемой системы передачи данных, характеризуется также явлением непроходимости (замиранием сигнала) в течение некоторого периода, вызванного ионосферными возмущениями и как следствие, изменением коэффициента передачи физического канала. В основе данного явления лежат: сложность приема сигнала, распространяющегося по различным траекториям. Интерференция лучей в точке приема в условиях изменения их фаз приводит к явлению замирания [1, 2, 3, 8, 11]. Вследствие большой зашумленности физической среды, наличия кратковременных и длительных замираний, обусловленных случайными флуктуациями параметров передаваемых сигналов, надежность передачи данных в исследуемой системе является недостаточно высокой. Особенности распространения сигнала в физической среде, при определенных условия

приводят к значительному ухудшению качества передаваемого сигнала или отказу системы. В этом случае передача данных узлу назначения может быть не выполнена или осуществляется с большими задержками.

Приведенные в источнике [1] результаты исследований говорят, что наибольшее влияние на качество физических каналов исследуемой коммуникационной системы оказывают помехи относящиеся к виду сосредоточенных. Данный вид помех имеет энергетический спектр сигнала в узкой частотной области соизмеримой с шириной полосы частот полезного сигнала. Сосредоточенные помехи создаются сторонними радиопередающими системами, излучающими в соответствующей частотной области, или узлами исследуемой системы передачи данных, конкурирующими за эфир. В этом случае сигналы передающих узлов на входе принимающего узла представляют суперпозицию передаваемых сигналов, ослабевающих с учетом пройденного расстояния. В этом случае принимающий узел решает статистические задачи определения и выделения сигнала на фоне шума. При этом условия распространения, дальность и мощность полезного сигнала и помехи могут быть сопоставимы.

Другим видом помех, так же оказывающим наибольшее влияние на качество физических каналов исследуемой системы передачи данных, являются помехи флуктуационные – суммарные помехи от различных источников таких как: соседние станции, тепловой шум, космические и атмосферные помехи [1]. Флуктуационные помехи есть непрерывный во времени случайный процесс с нормальным распределением мгновенных значений и нулевым средним значением уровней сигналов помехи.

В [8] приведены результаты исследований распределений вероятностей длительностей выбросов помех  $T_{\Pi}$  и интервалов  $Q_{\text{инт}}$  между ними на условно пороговых уровнях. Так, при 15-минутных дискретных измерениях с шагом  $t \approx 4\text{с}$  для физической среды исследуемой системы передачи данных было определено, что средние длительности помех и интервалов между ними являются случайными величинами и часто различаются для отдельных физических каналов. Распределение средних длительностей  $\overline{T_{\Pi}}$  и  $\overline{Q_{\text{инт}}}$  описывается нормальным законом. Обобщенное распределение вероятностей равных средних длительностей помех и интервалов между ними составляют:  $\overline{T_{\Pi;0.5}} = \overline{Q_{\text{инт};0.5}} = 15.5 \div 16.5$  мин. при  $\sigma_{\overline{T_{\Pi}} = \overline{Q_{\text{инт}}}} \approx 4 \div 4.5$  мин. [8].

На качество принимаемого сигнала существенное влияние оказывают замирания [2;6;7;9;10]. Для физических каналов исследуемой системы характерны интенсивные медленные изменения уровня сигнала длительностью до нескольких минут [2], обусловленные интерференцией в точке приема обыкновенной и необыкновенной составляющих сигнала; рассеянием радиоволн на неоднородностях ионосферы и интерференцией рассеянных волн [2, 6], так, что эти изменения нельзя считать стационарным случайным процессом. Из практики

магистральных систем передачи данных принято разделять замирания на быстрые и медленные по длительности периода замирания. При этом замирания длительностью менее 30с считаются быстрыми, более 30с медленными [2]. На основе статистических данных приведенных в [2, 6, 7, 10], установлено, что средний период медленных замираний колеблется в пределах  $1.7 \div 5.0$  мин.

Таким образом, основываясь на результатах анализа статистических данных [1, 2, 6, 7, 8, 10] помехи, действующие в физической среде, являются серьёзным препятствием для организации информационного обмена. Следовательно, для организации информационного обмена узлам коммуникационной системы необходимо выполнять оценку качества сигналов, принимаемых от соседних узлов. На основе полученных, в течение заданного периода времени, оценок качества принимаемых сигналов, формируется база статистических данных, обработка которых позволит выполнять оценку качества информационного обмена для каждой пары соседних узлов. Влияние сосредоточенных помех может быть снижено за счет использования методов резервирования и смены физических каналов и (или) перенаправления потоков данных через линии передачи данных с большей надежностью. Для решения проблемы кратковременных замираний используются методы помехоустойчивого кодирования [9, 12, 13, 14, 15, 16]. Для решения проблемы длительных замираний сигнала предлагается создание восстанавливаемых систем передачи блоков данных с резервированием каналов и их заменой в случае снижения качества принимаемого сигнала на основе разработанных алгоритмов.

Организация обмена данными в условиях нестационарности параметров физической среды и различий в качестве приема сигналов пространственно-разнесенных узлов требуют решения следующих задач:

- определение наиболее надежных физических каналов для каждой пары соседних узлов;
- разработка метода использования ресурса физических каналов для организации трасс командного и информационного взаимодействия;
- определение методов доступа к среде передачи данных и алгоритмов обмена данными, обеспечивающих взаимодействие узлов в условиях изменения качества принимаемых сигналов;
- повышение надежности обмена данными между соседними узлами.

Таким образом, анализ особенностей среды распространения сигналов показал, что каналы связи, являются нестационарными в виду значительных случайных изменений показателей качества. Случайные изменения вероятностно-временных показателей качества среды создают условия, при которых непосредственное взаимодействие узлов является затрудненным, а в некоторых случаях невозможным. Определен период квази-стационарности

каналов исследуемой системы, длительность которого составляет:  $T_{\text{КСК}} = 15.5 \div 16.5$  мин. при среднеквадратическом отклонении  $\approx 4 \div 4.5$  мин. Таким образом, для решения задачи доставки сообщений конечным абонентам в условиях нестационарности среды обмена данными необходимо выполнять поиск каналов связи, удовлетворяющих заданным требованиям надежности. Оценка надежности каналов выполняется на основе взаимодействия узлов коммуникационной системы. Для обеспечения взаимодействия узлов необходимо выполнить функциональное разделение и определить алгоритмы использования каналов обмена данными. При отсутствии непосредственного взаимодействия доставка сообщений выполняется ретрансляцией пакетов данных по маршрутам до узла назначения.

## **1.2. Идентификация параметров качества среды распространения носителей информации**

Оценка качества канала связи определяется его помехозащищенностью, в частности, вероятностью ошибки принимаемого сигнала [2]. При передаче данных между узлами системы основным показателем качества линий передачи данных является непрерывность передачи информации, выраженная через показатель готовности [2, 9, 11, 17, 18]. При оценке помехозащищенности следует учитывать статистические характеристики сигнала. Кроме того оценка помехозащищенности требует учета влияния медленных замираний сигнала, обусловленных флуктуациями параметров физической среды и многолучевым распространением сигнала.

Для оценки состояния физического канала используются такие показатели как – относительное число ошибок при приеме заданной последовательности, вероятность исправного состояния, надежность и т.п. [2, 3, 4, 5, 6, 8, 9]. Надежность физического канала определяется по величине отношения сигнал/шум. В работе [2] приведены результаты экспериментов, показывающие, что повышение надежности передачи данных достигается только с помощью запасов отношения сигнал/помеха. Следовательно, повышение надежности передачи данных в первую очередь основывается на выборе наилучшего физического канала по соотношению мощностей сигнала  $P_c$  и помехи  $P_n$ , где  $P_c = h^2 P_n$ , где  $h^2$  – коэффициент превышения по напряжению или коэффициент защиты [8, 9, 11]. Многочисленные эксперименты показывают, что в физических каналах исследуемой коммуникационной системы на интервалах времени порядка нескольких минут (3 –10 мин.) процесс флуктуации мощности сигнала, а также процесс быстрых замираний сигнала наиболее точно описывается законом распределения Рэля. Медианная длительность замираний на среднем уровне сигнала

составляет примерно  $0.5 \div 2.5$  с. [8]. На более длительных интервалах времени от 7-10 минут до 2-4 часа флуктуации мощности сигнала, а также процесс длительных замираний сигнала наиболее точно описывается нормальным законом распределения [8].

Во всех случаях оценка качества может быть достоверной только при учете изменчивости характеристик принимаемого сигнала. Контроль характеристик принимаемого сигнала выполняется всеми узлами коммуникационной системы в ходе взаимодействия (через заданные и случайные интервалы времени). Каждый узел выполняет сбор и обработку статистических данных принимаемых от соседних узлов сигналов во всех используемых для взаимодействия физических каналах. Полученная информация используется для выбора наиболее надежных физических каналов, формирования на их основе линий передачи данных и определения маршрутов передачи данных удаленным узлам коммуникационной системы.

Вероятность ошибки при приеме элемента сигнала  $p_{\text{ош}}$  на фоне нормальной стационарной помехи выражается как функция через коэффициент отношения энергии сигнала к спектральной плотности помехи на входе приемного устройства [2, 8, 9, 11]. Мощность сигнала в точке приема является случайной величиной, изменяющейся во времени и по диапазону частот. Следовательно, и  $p_{\text{ош}}(h^2)$  является величиной случайной [2, 8, 9, 11]. При приеме двоичных сигналов в относительно узкой полосе отношение сигнал/помеха [8, 11] равно:

$$h^2 = \frac{P_c}{P_n}, \quad (1.2.1)$$

где  $P_n$  – мощность помехи. Для оценки величины  $h^2$  в децибелах относительно  $h^2 = 1$  в [8] получено следующее выражение:

$$z = 10 \lg h^2 = 10 \lg \left( \frac{P_c}{P_n} \right). \quad (1.2.2)$$

Для различных моделей распространения сигналов в физической среде исследуемой коммуникационной системы [8, 11] приведены методы вычисления  $p_{\text{ош}}(h^2)$  для каналов с аддитивной помехой, с замираниями и без замираний. Так, для канала с аддитивной помехой в виде нормального шума и рэлеевскими замираниями вероятность ошибочного приема элемента двоичного сигнала определяется выражением [8]:

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{h_0^2 + 2}, \quad (1.2.3)$$

где  $h_0^2$  математическое ожидание  $h^2$ . При этом  $p_{\text{ош}}$  изменяется в диапазоне:

$$10^{-4} \leq p_{\text{ош}} \leq 10^{-1} \quad (1.2.4)$$

в зависимости от отношения сигнал/помеха, изменяющегося пределах:

$$40 \text{дБ} \leq z < 10 \text{дБ}. \quad (1.2.5)$$

Физические каналы исследуемой коммуникационной системы в силу резкой изменчивости спектральной интенсивности случайных радиопомех по времени и оси частот, а также из-за длительных изменений уровней сигналов являются нестационарными. Это приводит к необходимости оценивать не только вероятность ошибки  $p_{\text{ош}}$ , а так же определять вероятность ошибки в сравнении с допустимой  $p_{\text{ош, доп}}$  на основе известной экспериментальной статистики сигналов и помех, полученной в ходе обмена данными между соседними узлами коммуникационной системы. В [8] приводится методика расчета надежности приема дискретных сообщений с вероятностью ошибки меньше допустимой. Распределение вероятностей уровней помех и сигналов хорошо согласуется с нормальным распределением и распределением Рэлея, что соответствует особенностям физической среды, исследуемой коммуникационной системы.

Для организации обмена данными узлам, действующим в условиях нестационарности физических каналов, требуется определять надежность приема дискретных сообщений, передаваемых соседними узлами в каналах на основе сбора и обработки статистических данных качества принимаемых сигналов. Оценка надежности приема дискретного сообщения выполняется по величине вероятности надежного приема дискретного сообщения  $P_{\text{нпдс}}$ , относительно текущей и допустимой вероятностей ошибки элемента сигнала [8]. Используя полученные значения  $P_{\text{нпдс}}$  за период  $[t_i - \Delta T, t_i]$ , узлами выполняется прогнозирование состояния физического канала на период  $[t_i, t_i + \Delta T]$  выраженное в вероятности исправного состояния физического канала  $P_{\text{иск}}$ . Полученная оценка надежности положена в основу формирования линий передачи данных.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы, что для решения задачи формирования оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационной системе с нестационарными физическими каналами необходимо выполнение следующих условий:

- каждый узел выполняет сбор и обработку статистических данных качества сигналов, передаваемых соседними узлами в заданных физических каналах;
- оценка качества сигнала выполняется по величине вероятности ошибки сигнала  $p_{\text{ош}}$ , как среднее значение функции отношения сигнал/помеха на интервале приема дискретного сообщения (кадра);
- для каждой полученной оценки  $p_{\text{ош}, i}$  определять вероятность надежного приема дискретного сообщения  $P_{\text{нпдс}, i}$ , относительно текущей  $p_{\text{ош}, i}$  и допустимой  $p_{\text{ош, доп}}$  вероятностей ошибки элемента сигнала;

- каждая полученная оценка  $P_{\text{НПДС},i}$ , формирует дискретную последовательность статистических данных качества принимаемых от заданного соседнего узла сигналов в заданном физическом канале;
- для каждой пары соседних узлов определить период повторной оценки качества используемых физических каналов;
- для каждой пары соседних узлов определить периоды обмена данными о качестве используемых физических каналов  $\Delta T$ ;
- для каждого отношения соседства на основе последовательностей  $\{P_{\text{НПДС},i}\}$ , полученных для каждого физического канала, формировать прогнозируемые на период  $[t_i, t_i + \Delta T]$  оценки исправного состояния физических каналов  $P_{\text{ИСК}}$ .

Таким образом, в результате идентификации параметров качества среды распространения сигналов получено, что для оценки качества канала связи выбрана вероятность ошибки элемента сигнала. Для оценки качества обмена данными смежных узлов используется вероятность приема дискретного сообщения в текущем физическом канале от заданного смежного узла, относительно заданного порогового значения вероятности ошибки элемента сигнала. Для организации непосредственного информационного взаимодействия между парой смежных узлов в заданном физическом канале необходимо формирование прогнозируемой вероятностной оценки исправного состояния канала на заданном интервале времени, не превышающем период квазистационарности физического канала. Прогнозируемая вероятностная оценка исправного состояния канала формируется каждым узлом для каждого смежного с ним узла.

### **1.3. Анализ методов и алгоритмов непосредственного взаимодействия узлов исследуемой коммуникационной системы**

В результате анализа особенностей физической среды и основных видов помех, действующих в физических каналах исследуемой коммуникационной системы получено, что большая зашумленность каналов, нестационарность их параметров и наличие замираний сигналов не позволяют определить единый физический канал для организации обмена данными группы пространственно-разнесенных узлов с различными условиями приема сигналов. Следовательно, непосредственный обмен данными между узлами должен осуществляться при использовании множества каналов, сменяющих друг друга в соответствии с заданным алгоритмом, что должно обеспечить необходимый уровень надежности обмена данными. Кроме того, каждая пара соседних узлов в ходе взаимодействия с заданной периодичностью

определяет каналы, обладающие наилучшим качеством приема сигналов, который могут быть использованы для обмена полезными данными.

При включении узла в коммуникационную систему необходимо обеспечить возможность его взаимодействия с соседними узлами при отсутствии каких-либо сведений о качестве физических каналов. Для решения данной задачи необходимо выполнить функциональное разделение множества физических каналов на подмножества командного и информационного взаимодействия. Необходимо обеспечить взаимодействие множества  $N$  соседних узлов системы в условиях нестационарности физических каналов и различий в условиях приема пространственно-разнесенных узлов. Для этого, подмножество каналов управления образуют единую, разделяемую между узлами системы, среду доступа [13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 40]. Единая среда управления (среда установления соединения) позволяет обнаруживать соседние узлы, определять качество сигналов, принимаемых от соседних узлов в различных физических каналах, каждому узлу для каждого отношения соседства определять на заданном интервале времени каналы, обеспечивающие наилучшее качество взаимодействия с соседними узлами. Организация взаимодействия узлов в единой среде подразумевает применения методов конкурентного доступа [13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 40]. Кроме того, нестационарность физических каналов, различия в условиях приема пространственно-разнесенных узлов и действие мешающих факторов приводят к необходимости использования синхронных методов доступа к единой среде. В этом случае смена каналов и доступ к среде выполняются всеми узлами системы относительно некоторой единой системы синхронизации. Это позволит осуществлять обмен данными между соседними узлами с надежностью превышающей надежность попытки обмена данными в заданной физической канал.

В результате взаимодействия узлов в командной среде каждый узел определяет соседние с ним узлы, поддерживает обмен управляющими данными в командной среде и для каждого отношения соседства определяет подмножество каналов, обеспечивающих обмен полезными данными с соседним узлом с заданным уровнем качества. Следовательно, взаимодействие узлов в условиях нестационарности физических каналов и различий в условиях приема пространственно-разнесенных узлов, состоит из этапов:

- командного взаимодействия;
- передачи данных.

При обработке запроса передачи данных соседние узлы в среде командного взаимодействия выполняют попытки установления соединения. При успешном установлении соединения узлы переходят к процедуре обмена данными в среде передачи данных. На этапе

передачи данных обеспечивается непосредственный обмен полезными данными между парой соседних узлов в режиме «точка-точка» в каналах, отобранных в ходе командного взаимодействия и обладающих наилучшими показателями качества.

В результате взаимодействия узлов формируется топология коммуникационной системы. Исследуемая коммуникационная система не имеет выделенных сетевых устройств и подготовленной сетевой инфраструктуры. Тогда, каждый узел системы сочетает в себе функции абонентского терминала и системы управления трафиком. Топология исследуемой коммуникационной системы является многосвязной и динамической. Пусть топология коммуникационной системы определяется графом:

$$G = (N, L), \quad (1.3.1)$$

где  $N$  – множество узлов системы и  $L$  – множество линий передачи данных, связывающих узлы. Каждая  $l = (i, j); l \in L$  соответствует паре упорядоченной узлов  $(i, j)$  и указывает на то, что узел  $j$  может принимать сообщения, передаваемые узлом  $i$  при однонаправленной связи между узлами  $i, j$ . При двусторонней связи:

$$(i, j) = l \text{ и } (j, i) = l, l \in L \quad (1.3.2)$$

узлы являются соседними. При множественном доступе узлы конкурируют за среду. В этом случае доступ к среде организуется конкурентным способом. Если узел  $i$  выполняет передачу кадра, то  $j$  его принимает безошибочно в случае, если:

- существует линия передачи данных  $(i, j) \in L$ ;
- никакой узел  $r$ , для которого выполняется условие  $(r, j) \in L$  не передает одновременно с узлом  $i$ ;
- узел  $j$  не передает одновременно с узлом  $i$ .

В случае несоблюдения перечисленных условий и одновременной попытке передачи узлами, входящими в подмножество соседних узлов  $M \in N$ , их сигналы создают сосредоточенные помехи (интерференции) на входах принимающих узлов  $M$  [19, 22, 23].

Для обеспечения приема передаваемых кадров данных должно быть обеспечено заданное превышение мощности сигнала над мощностью различного рода помех на входе принимающего узла. Так как помехи, на входе узлов, являются аддитивными, состоящими из помех природного и искусственного происхождения, а также затухающих сигналов, конкурирующих за среду, соседних узлов, то в случае выделения полезного сигнала на фоне действующей помехи принимающим узлом будет принят кадр, передаваемый одним из соседних узлов. Остальные передаваемые кадры будут потеряны.

Организация обмена данными в условиях физической среды исследуемой коммуникационной системы требует применения механизма подтверждения успешного приема

переданных данных. Тогда, попытка передачи пакета данных считается успешной, если передающий узел получил ответный управляющий кадр – квитанцию, подтверждающую прием переданных данных. Неудачной попыткой передачи кадра данных является отсутствие в течение заданного периода ожидания квитанции на отправленный кадр данных. Следовательно, попытка передачи данных состоит из последовательной передачи кадров данных и подтверждения.

Установление соединения, управление трафиком и передача данных должны выполняться соответствующими протоколами и методами организации доступа к среде [12]. Протоколы доступа к среде, применяемые в системах передачи данных, аналогичных исследуемой, рассмотрены в работах [13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 40]. Для формирования среды установления соединения исследуемой коммуникационной системы используем основные положения слотированного метода доступа – Slotted ALOHA [14, 15, 22, 23, 25, 26]. Данный метод позволяет организовать взаимодействие конкурирующих за среду узлов системы при нестационарности отдельных физических каналов, возникновении замираний сигнала и различий в условиях приема пространственно-разнесенных узлов. Доступ к среде установления соединения с применением протокола Slotted ALOHA выполняется в синхронном режиме. Для каждого физического канала среды установления соединения выделяется период активности  $T_K$ , после чего происходит смена физического канала. Время канала  $T_K$  разделено на слоты  $T_{сл}$ , где  $T_K = n * T_{сл}$ . Попытки узлов получить доступ к среде выполняются синхронно с началом слота [22, 41, 42]. Общим недостатком методов ALOHA является недостаточная случайность выбора задержки повторной попытки передачи, не позволяющая увеличить пропускную способность среды.

Более высокие значения пропускной способности среды достигаются при использовании методов прослушивания несущей в среде с множественным доступом с избеганием конфликтов (CSMA/CA) [19, 22, 23, 25, 30, 31, 32, 33]. Узел, получивший требование обслуживания, выполняет прослушивание среды. Передача выполняется, если среда свободна и откладывается, если среда занята. Передача считается успешной, если в течение периода ожидания от адресата получено подтверждение, иначе отправитель определяет ошибку передачи. В этом случае отправитель случайным образом выбирает момент повторной попытки передачи пакета, что уменьшает вероятность возникновения конфликта с другими передающими узлами [19, 22, 23, 25, 30, 31, 32, 33]. Также для уменьшения конфликтов используются методы прослушивания среды. Если среда свободна, то выполняется передача, иначе передача откладывается. Синхронная версия данного метода основана на квантовании моментов появления событий, таких как начало передачи. Время слота  $T_{сл}$  выбирается в соответствии с временем,

необходимым на передачу и обработку кадров данных. Выбор величины отсрочки начала передачи выполняется в слотах, начало передачи выполняется с началом слота [22, 23, 24].

Для обеспечения обмена данными вслед за этапом установления соединения узлы переходят непосредственно к передаче полезных данных. Обмен полезными данными выполняется в среде передачи данных. При индивидуальном вызове используется асинхронный метод доступа в режиме точка-точка. Следовательно, протокол обмена данными должен обеспечивать взаимодействие пары узлов при отсутствии конкуренции за среду и учитывать влияние помех на качество обмена данными. Для решения подобных задач применяются протоколы второго уровня модели OSI, обеспечивающие передачу данных между устройствами в режиме точка-точка (или точка-многоточка) такие как: HDLC [36], AX.25 [37], PPP [38] и т.п. Для реализации обмена полезными данными узлов исследуемой коммуникационной системы используем базовые принципы взаимодействия, обеспечиваемые указанными протоколами. Так, протокол действующий в среде передачи данных должен обеспечить передачу данных между парой узлов, где между узлами отсутствует конкуренция за среду, узлы действуют в соответствии с назначенной ролью («Лидер», «Ведомый»), протокол поддерживает квитирование передаваемых данных и обеспечивает повторные попытки передачи в случае потери передаваемых данных и т.п.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы, что для решения задачи формирования оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационной системе с нестационарными физическими каналами требуется:

- использовать для организации обмена данными множество каналов;
- выполнить функциональное разделение каналов для формирования сред командного взаимодействия (установления соединения) и передачи данных;
- среда установления соединения обеспечивает множественный конкурентный доступ в синхронном режиме с квитированием принимаемых данных;
- метод синхронного доступа необходимо дополнить функциями прослушивания среды доступа, снижающими вероятность повторных неудачных попыток передачи кадров данных в результате конкуренции за среду;
- для непосредственного обмена данными каждым узлом для каждого отношения соседства формируется среда передачи данных, состоящая из множества каналов, обладающих наилучшими показателями качества обмена данными заданной пары соседних узлов;
- доступ к среде передачи данных выполняется в асинхронном режиме «точка-точка»;
- обмен данными между парой узлов выполняется с квитированием принимаемых данных и повторными попытками передачи в случае потери передаваемых данных;

- для выполнения обмена данными в средах установления соединения и передачи данных необходимо определить алгоритмы информационного обмена.

Таким образом, в результате анализа методов и алгоритмов непосредственного взаимодействия узлов определено, что: для организации обмена данными между узлами в условиях нестационарности среды распространения сигнала необходимо формирование сред с различными свойствами, методами доступа и алгоритмами передачи данных, обеспечивающих взаимодействие узлов на разных этапах обмена данными. Среда с множественным конкурентным синхронным доступом по типу Slotted Aloha обеспечит командное взаимодействие смежных узлов. В ходе командного взаимодействия узлов определяются показатели надежности каналов связи. Среда с асинхронным доступом «точка-точка» по типу HDLC обеспечит взаимодействие пары смежных узлов при передаче полезных данных в каналах с наибольшей надежностью. Алгоритмы обмена данными, действующие в средах, поддерживают квитирование передаваемых данных.

#### **1.4. Анализ топологии и методов формирования маршрутов доставки сообщений**

Исследуемая коммуникационная система предназначена для обеспечения обмена данными между узлами, удаленными на значительные расстояния. Каждый узел системы функционально автономен и содержит в составе набор функций стека протоколов модели OSI [25, 30, 39, 48], обеспечивающих его взаимодействие с соседними и удаленными узлами средствами канального сетевого уровней. Каждый узел:

- произвольно выполняет подключение к системе передачи данных;
- определяет соседние с ним узлы и устанавливает с ними отношения соседства;
- используя отношения соседства формирует таблицу маршрутов передачи данных удаленным узлам.

При оперативном развертывании исследуемой системы передачи данных соединение между узлами выполняется по принципу «каждый с каждым» [49]. В результате топология исследуемой системы передачи данных является распределенной динамической самоорганизующейся многополюсной. Децентрализованность, быстрое развертывание, хорошая масштабируемость, наличие  $K$  связей между любой парой узлов системы, высокая надежность позволяют применять системы многосвязной топологии в ситуациях, когда отсутствует какая-либо заранее развернутая инфраструктура коммуникационной системы [19, 20, 22, 28, 29, 49, 50].

Использование функционально автономных узлов позволяет создавать самоорганизующиеся децентрализованные системы. Примеры данных систем, построенных по принципу Ad hoc или MANET (Mobile Ad hoc Network), приведены в источниках [28, 29]. Каждое устройство такой системы может независимо разрывать и устанавливать соединения с другими узлами. Каждый узел сети может быть использован для пересылки данных другим узлам. При этом определение того, какому узлу пересылать данные, производится динамически на основании связности системы. Топология системы меняется в случае её масштабирования, изменения географического положения узлов, изменения условий распространения сигналов, изменения помеховой обстановки. Узлы системы, соединяясь линиями передачи данных, формируют многосвязную топологию исследуемой коммуникационной системы (а 1.5.1). Каждый узел на основе отношений соседства определяет топологию системы и её изменения и строит маршрутную таблицу.

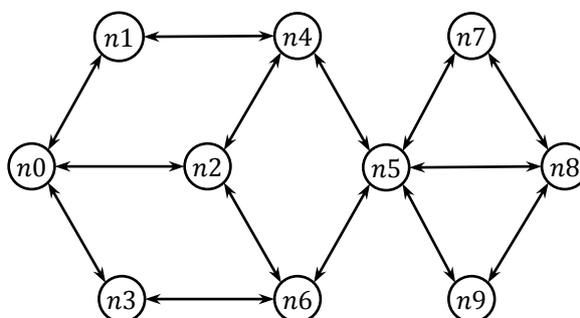


Рисунок 1.4.1 Топология исследуемой коммуникационной системы

Надежность систем ячеистой топологии определяется  $K$  – связностью узлов.  $K$  – связность топологии системы позволяет получать не менее  $K$  непересекающихся в узлах путей передачи данных [43, 44, 45, 46, 47, 49, 50]. Надежность систем, основанных на  $K$  – связной топологии при  $K > 1$ , позволяет использовать резервные маршруты передачи данных. Применение распределенной самоорганизующейся топологии с  $K$  связями между узлами типа Mesh [19, 49, 50, 51, 52] в системе с нестационарными зашумленными физическими каналами является перспективным решением для организации обмена данными.

Взаимодействие соседних узлов выполняется на основе сформированных инцидентных узлам линий передачи данных, соответствующих условию (1.4.2), и действующих в них механизмов доступа к среде и протоколов передачи данных. В ходе поддержки отношений соседства узлы выполняют сбор и обработку статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов. Полученные статистические данные о качестве принимаемых сигналов ложатся в основу весовой оценки надежности линий передачи данных. Исходя из особенностей распространения сигналов, взаимодействие узлов источника  $s$  и назначения  $d$ , не являющихся соседними, где:

$$(s, i) \in l_{s,i} \text{ и } (j, d) \in l_{j,d}, \text{ при } l_{s,i} \neq l_{j,d}; (l_{s,i}, l_{j,d}) \in L \quad (1.4.1)$$

должно осуществляться путем последовательной передачи пакетов по цепочке  $\{l_{i,j}\} \in L$ , составляющих маршрут  $K$ . Передача пакетов данных осуществляется от узла источника до узла назначения через узлы следующего перехода. Каждый узел самостоятельно формирует таблицу маршрутов и принимает решение о выборе узла следующего перехода для доставки пакета узлу назначения. В качестве основы для определения маршрутов передачи данных необходимо использовать протоколы маршрутизации, применяемые в системах с топологией типа Mesh на базе Ad-hoc соединений [16, 49, 50, 53, 54, 55, 56].

В пакетных коммуникационных системах применяются реактивные, проактивные и гибридные протоколы маршрутизации. Реактивные протоколы маршрутизации формируют маршруты передачи данных только при поступлении требования обслуживания (on-demand), путем выполнения лавинной рассылки запроса поиска маршрута. При обнаружении маршрута передачи данных отправитель сохраняет полученную информацию и использует для передачи пакетов адресату. При данном способе маршрутизации узлы хранят информацию только о действующих маршрутах [28, 29, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59]. Преимущества данного метода заключаются в:

- возможности формирования маршрутов в коммуникационной системе с нестабильной топологией, где время сходимости системы превышает или сопоставимо с периодом возникновения событий изменения топологии;
- отсутствии необходимости сбора сведений о текущей топологии системы и их периодической актуализации;
- отсутствии необходимости в поддержке отношений соседства.

Это снижает интенсивность служебного трафика и расход энергии элементов питания узлов коммуникационной системы.

К недостаткам протоколов данного типа следует отнести значительную задержку отправки пакетов данных, связанную с выполнением процедуры формирования маршрута. Величина задержки зависит от размера и загруженности системы. Также к недостаткам данного типа протоколов следует отнести большие пиковые значения интенсивности потоков данных в момент определения маршрута. Реактивные протоколы маршрутизации не имеют информации о топологии системы в целом и, следовательно, не имеют возможности использования альтернативных маршрутов и управления потоками. Применительно к исследуемой коммуникационной системе следует также учесть увеличение времени формирования маршрута за счет различий в условиях приема пространственно-разнесенных узлов, а также необходимость поиска физических каналов с удовлетворительным качеством приема сигналов.

При отсутствии отношений соседства не выполняется сбор статистических данных качества принимаемых сигналов. Следовательно, нет возможности выбрать наиболее надежные линии и маршруты передачи данных.

Проактивные протоколы маршрутизации позволяют сформировать маршруты передачи данных до возникновения требований доставки пакетов данных на основе поддержки отношений соседства определения топологии системы [28, 29, 49, 50, 53, 54, 55]. Определение топологии и вычисление маршрутов передачи данных в ad-hoc системах выполняется каждым узлом на основе данных о состоянии интерфейсов узла и данных, полученных узлом от соседних узлов. Протоколы маршрутизации, применяемые в ad-hoc системах и использующие сведения о топологии, относятся к topology-based-ориентированным [28, 29, 40, 53, 54]. Протоколы данного типа генерируют потоки служебных данных. Процесс обмена служебной информацией может носить лавинный или диффузионный характер [20, 22, 25, 30]. На основе полученных сведений протоколы строят таблицу маршрутов, используя различные алгоритмы и методы определения наилучших путей передачи данных [20, 22, 28, 29, 30, 39, 43, 45, 46, 49, 50, 51, 60]. Обладая сведениями о топологии системы протоколы маршрутизации, способны передавать пакеты данных альтернативными маршрутами, а при оценке качества линий передачи данных также использовать методы оптимальной маршрутизации [20, 22] или алгоритмы максимального потока [43, 44, 46, 47, 45], используя для формирования маршрутов различные по типу и сложности весовые оценки [61, 62, 61].

К недостаткам протоколов данного типа можно отнести значительные накладные расходы на определение топологии системы, а также большое время реакции на изменение топологии при большом количестве узлов и сложности топологии.

Основу функционирования topology-based протоколов маршрутизации, составляют методы определения узлами сведений о топологии системы. Среди них можно выделить различные варианты лавинного распространения информации, топологический алгоритм кратчайшего пути и алгоритм диффузного распространения информации. При лавинном методе распространения информации о топологии системы каждое событие изменения топологии порождает поток служебной информации, распространяемый от узла к узлу, пока не будет достигнута сходимость системы, при которой каждый узел системы располагает актуальной базой данных топологии системы. Подобные системы реализуют принцип маршрутизации – «по состоянию канала». Изменения в топологии вызывают рост интенсивности служебного трафика [22, 64, 65].

Диффузионный метод распространения топологической информации исключает трансляцию (лавинное распространение) пакетов контроля топологии [49]. Вместо этого узел,

принявший пакет-уведомление об изменении топологии вносит изменения в свою базу данных маршрутной информации и информирует соседние с ним узлы, об обнаруженных им изменениях. Примером диффузного метода является алгоритм Diffused Update Algorithm (DUAL) [39, 60, 66]. В этом случае маршрутизатор создает вектор (запись в таблице маршрутов) до каждого известного узла назначения. В отличие от протоколов «по состоянию канала» протоколы «вектор-расстояние» не актуализируют копию базы данных всей топологии, а распространяют лишь наилучшие маршруты до известных узлов назначения, что значительно снижает интенсивность служебного трафика. В базе данных узла содержатся записи о вероятных маршрутах до удаленных узлов системы, маршруты о которых сообщены соседними узлами. В таблицу маршрутизации отбираются маршруты, имеющие наилучшие весовые оценки передачи пакетов до узла назначения. Остальные маршруты считаются альтернативными.

Диффузный метод определения топологии отличается невысокими требованиями к пропускной способности системы, малой интенсивностью служебного трафика, возможностью функционирования в динамической топологии, возможностью использования альтернативные маршрутов [49, 50]. Таким образом, данный метод позволяет использовать многосвязность исследуемой системы, что в условиях нестационарности физических каналов будет иметь большое значение для обеспечения доставки сообщения.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы, что для решения задачи формирования оптимальных по критерию надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационной системе с нестационарными физическими каналами требуется:

- узлы исследуемой коммуникационной системы являются функционально автономными, обеспечивая точки выхода и входа информационных потоков, а также выполняя определение топологии коммуникационной системы и формирование маршрутов передачи данных, что позволяет создавать самоорганизующиеся децентрализованные системы;
- каждый узел системы самостоятельно устанавливает и поддерживает отношения соседства с обнаруженными узлами системы, используя Ad-hoc соединения;
- на основе поддерживаемых отношений соседства и функциональной автономности узлов формируется распределенная самоорганизующаяся динамическая многосвязная топология исследуемой коммуникационной системы;
- каждый узел на основе отношений соседства определяет маршруты передачи данных удаленным узлам;
- определение топологии системы и формирование маршрутов передачи данных выполняется при помощи диффузного метода распространения маршрутной информации;

- формирование таблиц маршрутизации выполняется проактивным табличным методом;
- для решения задачи передачи данных в исследуемой коммуникационной системе с нестационарными каналами формирование линий передачи данных и маршрутов передачи данных должно выполняться на основе оценки их надежности.

Таким образом, в результате анализа топологии и методов формирования маршрутов доставки сообщений установлено, что коммуникационная система действует в условиях отсутствия выделенной подготовленной инфраструктуры управления информационными потоками, каждый узел функционально автономен и самостоятельно формирует линии передачи данных и определяет маршруты доставки сообщений. Взаимодействие между узлами выполняется по принципу «каждый с каждым». Узлы условно мобильны и коммуникационная система имеет самоорганизующуюся многосвязную нестационарную топологию типа «Mesh». Для минимизации времени на принятие решения о выборе маршрута необходимо использование проактивной таблично-ориентированной системы маршрутизации. Распространение информации о топологии коммуникационной системы целесообразно выполнять диффузным способом.

### **1.5. Исследование существующих критериев оценки надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационных системах с потерями**

Доставка сообщений удаленным узлам исследуемой коммуникационной системы осуществляется средствами маршрутизации передаваемых пакетов данных. Маршруты доставки сообщений формируются каждым узлом исследуемой системы передачи данных. Любой маршрут от узла источника до узла назначения представляет собой конечную последовательность линий передачи данных  $\{l_{i,j}\} \in L$ , соединенных инцидентными вершинами  $\{i,j\} \in N$ , связывающих узел источник  $s$  с узлом назначения  $d$ . Линии передачи данных  $\{l_{i,j}\} \in L$  являются элементами маршрута передачи данных  $R_{sd}$ . Линии передачи данных создаются узлами системы для каждого отношения соседства. Основу линий передачи данных обеспечивающих составляют каналы с нестационарными показателями качества (разделы 1.1 – 2).

Основная задача протокола маршрутизации это – определение оптимального, по заданному критерию, маршрута передачи данных до узла назначения. Весовая оценка т.н. «метрика» представляет собой некоторую числовую характеристику маршрута передачи данных, учитывающую один или более критериев определения веса маршрута [67]:

- количество переходов (хопов), которое необходимо выполнить для доставки пакета узлу назначения;
- полоса пропускания канала;
- стоимость передачи данных по каналу;
- задержка передачи данных;
- заряд аккумуляторов;
- надежность и т.д.

Применяемая для решения задач маршрутизации, метрика должна учитывать особенности системы передачи данных, в которой выполняется формирование маршрутов передачи данных. Применяемая метрика должна отражать важнейшие для определенного типа потока данных свойства. Так в работе [67] указывается, что набор подобных параметров и оценки их значимости в рамках метрики должны формироваться, основываясь на решаемых в рамках данной коммуникационной системы задачах. Исследуемая коммуникационная система действует в условиях высокой зашумленности физических каналов, нестационарности показателей их параметров, различий в условиях приема сигналов пространственно-разнесенных узлов, что делает передачу данных ненадежной. Следовательно, при решении задачи организации обмена данными в условиях нестационарности каналов, формирование линий передачи данных и выбор маршрутов передачи данных должно осуществляться на основе весовой оценки, включающей оценки надежности физической среды.

В результате анализа особенностей формирования маршрутов (раздел 1.5) получен вывод о том, что исследуемая коммуникационная система имеет многосвязную топологию типа Mesh. В настоящее время ряд применяемых в многосвязных системах передачи данных протоколов маршрутизации используют параметр оценки надежности в качестве метрики или компоненты метрики маршрута доставки пакетов данных. Подобная конструкция метрики применяется в протоколе маршрутизации EIGRP [39, 68, 69, 70, 71, 72]. Оценка надежности линий и маршрутов передачи данных в составе композитной метрики определяется количеством потерянных пакетов (packet loss). Для получения численного выражения коэффициента надежности используется выражение [70]:

$$loss_{rate} = 256 * \frac{loss_{count}}{ctotal}, \quad (1.5.1)$$

где  $loss_{count}$  – количество потерянных пакетов;  $ctotal$  – общее количество ожидаемых пакетов. Таким образом, маршрутизаторы на базе EIGRP определяют надежность  $loss_{rate}$  в диапазоне (0 ÷ 255). То есть 255/255 – это 100% надежность или совершенно стабильная ссылка; значение 229/255 представляет собой надежность ссылки 90%.

Применяемая в EIGRP метрика не учитывает физические особенности линий передачи данных (за исключением пропускной способности). Применение метода  $loss_{rate}$  не позволяет оценить надежность линий передачи данных как системы, компоненты которой действуют в различных условиях под управлением различных протоколов обмена данными. Применяемая в EIGRP метрика не учитывает:

- наличие резервных элементов в составе линии передачи данных;
- различия в условиях приема пространственно-разнесенных узлов;
- периодические длительные изменения физической среды с периодом квазистационарности.

Системы передачи данных с топологией Mesh часто применяют протоколы AODVv2 [73], OLSR[64, 65], DSDV[74]. Указанные протоколы имеют возможность использовать различные варианты метрики, однако, по умолчанию используют простейшие метрики типа Hop-Count, использующая количество переходов до узла назначения в качестве стоимости доставки пакетов данных [58, 59]. Данные протоколы в конфигурации по умолчанию не имеют средств оценки надежности линий и маршрутов передачи данных. Также применяются другие критерии оценки. К подобным протоколам относится протокол маршрутизации Vabel [75, 76, 77], который вычисляет стоимость связей между любой парой соседних узлов, используя абстрактные значения весов ребер с инцидентными узлами. Кратчайший путь в графе определяется на основе алгоритма построения S – дерева с наименьшей метрикой. Основой для получения метрики является задержка передачи данных (RTT). В некоторых случаях метрика может быть композитной, например учитывать остаточный заряд аккумуляторов. Все указанные протоколы не содержат необходимых методов определения наилучших с точки зрения надежности маршрутов обмена данными в условиях нестационарной физической среды.

Для определения параметров, используемых в качестве компонент маршрутных метрик, в системах передачи данных с потерями «Low power and Lossy Networks - LLNs» [67, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85], в которых каналы передачи данных характеризуется высокими показателями потерь пакетов данных, низкой скоростью передачи данных и нестационарностью физической среды, рабочей группой ROLL организации IETF разработана спецификация RFC-6551 [78]. Спецификация содержит RFC-6551 набор рекомендаций по формированию одно и много компонентных метрик, параметром которых выступает в том числе надежность.

В LLN системах надежность соединения может ухудшаться по ряду причин: ослабление сигнала, действие помех различных форм природного и искусственного происхождения и т.д. (особенности распространения сигнала в физической среде, наличие замираний сигнала). Некоторые показатели качества физического канала, такие как частота ошибки элемента сигнала могут быть получены непосредственно в ходе приема сигнала, другие показатели могут

быть определены на основе вычислений. Изменение качества физической среды влияет на связность системы передачи данных; таким образом, оценка надежности соединений является необходимой мерой для маршрутизации в условиях нестационарности физической среды [67, 78, 83, 84, 85].

В результате анализа, приведенного в разделе 1.5 получено, что топология исследуемой системы передачи данных характеризуется как распределенная самоорганизующаяся динамическая многосвязная. Для решения задачи доставки сообщений удаленным узлам метрика маршрутов также должна быть динамически определяемая и отражающая изменения физической среды. Изменения метрики должны соответствовать динамике изменений состояния физической среды. Так, для исследуемой коммуникационной системы за основу может быть принят период квазистационарности состояния физического канала (раздел 1.2).

В задачи протокола маршрутизации входит не только определение наилучших маршрутов доставки пакетов данных, но и определение событий изменения топологии системы передачи данных. Источниками событий изменения топологии выступают процессы:

- масштабирования системы;
- изменения качества линий передачи данных;
- перераспределения потоков данных;
- возникновения отказов линий передачи данных и узлов системы;
- и т.п.

При нестационарности физической среды, события изменения топологии могут иметь интенсивность, при которой применение проактивных методов маршрутизации (раздел 1.4) становится неэффективным или невозможным. Для сохранения возможности применения проактивных методов маршрутизации линии передачи данных должны иметь механизмы, повышающие их надежность по сравнению с отдельными физическими каналами, а методы определения показателей надежности должны учитывать наличие механизмов повышения надежности. В этом случае интенсивность событий изменения топологии системы будет значительно ниже (не превысит) интенсивности отказов физической среды.

В соответствии со спецификацией RFC-6551 [78] маршрутные метрики могут быть построены двумя типами Link Quality Level (LQL) – уровень качества соединения и Expected Number of Transmissions (ETX) – прогнозируемое количество передач, производимых узлом, для доставки пакета узлу назначения. Механизмы и метрики LQL определяются конкретной реализацией, где метрика в диапазоне от 0 до 7 определяет некоторый уровень качества линии передачи данных. Метрика ETX является дискретным значением, полученным на основе заданного метода оценки качества линии передачи данных и модели её поведения.

Метрика ETX ориентирована на использование соотношения количества переданных и принятых пакетов и учитывает:

- интенсивности потерь в заданной линии передачи данных;
- выбор путей с наиболее высокой пропускной способностью и наименьшим количеством переходов;
- уровень помех канального уровня (возникающие при агрегировании различных потоков данных в заданной среде).

Метрика ETX формирует наилучшего маршрут т.к. является изотонической [86]. Согласно [67, 83, 84, 85] метрика ETX имеет следующие недостатки:

- метрика предназначена для одноканальной многошаговой беспроводной системы передачи данных;
- ETX учитывает коэффициент потерь соединения и не учитывает величину помех, оказывающих влияние на качество соединения;
- ETX не дает информации о совместном использовании соединения;
- ETX не учитывает загрузку соединений и т.д.

Также в настоящее время существует ряд метрик, являющихся расширением метрики ETX и рассчитанные на оценку качества передачи пакетов данных:

- Expected Transmission Time (ETT), Weighted Cumulative Expected Transmission Time (WCETT), оценивающие качество передачи данных по пропускной способности и ожидаемому времени передачи [67, 83, 84, 85, 87];
- Metric of Interference and Channel switching (MIC) и Exclusive Expected Transmission Time (EETT), учитывающие помехи, создаваемые межпоточковой и внутривидеопоточковой интерференции [67, 83, 84, 85];
- и т.п.

Особый интерес представляет метрика – Interference Aware routing metric (iAWARE) [67, 83, 84, 85, 88]. iAWARE – это метрика маршрутизации для радиосистем передачи данных с Mesh топологией, которая учитывает межпоточковые и внутривидеопоточковые помехи. Основу iAWARE составляет параметр SINR – Signal to Interference plus Noise Ratio model [88] или SNIR – Signal to Noise plus Interference Ratio model [89], определяемый как отношение мощности ( $P_k(l)$ ) сигнала на входе узла  $k$ , передаваемого соседним узлом  $l$ , к мощности суммарной помехи, состоящей из мощности фонового шума ( $N$ ) и суммы мощностей сигналов передающих соседних узлов ( $\sum_{i \neq k, l} P_k(i)$ ):

$$SINR(k) = \frac{P_k(l)}{N + \sum_{i \neq k, l} P_k(i)}, \quad (1.5.2)$$

где  $\tau(i)$  – весовой коэффициент, который задает нормализованную скорость передачи пакетов данных узлом  $i$ .  $\tau(i) = 1$  когда узел  $i$  рассылает пакеты на максимальной скорости.  $\tau(i)$  есть коэффициент, который зависит от технологии, применяемой в системе для снижения влияния помех. Метрика соединения iAWARE вычисляется следующим отношением:

$$iAWARE = \frac{ETT}{IR}, \quad (1.5.3)$$

где  $ETT$  – (Expected Transmission Time) [67, 87, 90] оценка ожидаемого времени передачи;  $IR$  – коэффициент интерференции в соединении между узлами  $(k, l)$ :

$$IR(k) = \frac{SNR(k)}{SNR(k)}, \quad (1.5.4)$$

где  $SNR(k) = \frac{P_k(l)}{N}$  – отношение мощности сигнала на входе узла  $k$ , передаваемого узлом  $l$ , к мощности фонового шума  $N$ . Тогда метрика маршрута  $p$  определяется выражением:

$$iAWARE(p) = (1 - \alpha) \sum_{i=1}^n iAWARE_i + \alpha * \max_{1 \leq j \leq v} X_j, \quad (1.5.5)$$

где  $n$  – количество соединений в маршруте  $p$ ;  $\alpha$  – переменный параметр, который выбирается в зависимости от среды и определяет связь между внутривиточковыми и межвиточковыми помехами;  $\max_{1 \leq j \leq v} X_j$  – коэффициент, определяющий пути с наименьшим влиянием внутривиточковых помех на множестве каналов с различным качеством сигнала [67, 88, 83].

Данная метрика учитывает:

- помехи, создаваемые соседними узлами при конкуренции за среду;
- интенсивности потоков данных в линии передачи данных, что позволяет выполнять балансировку нагрузки;
- фоновые помехи на входах пространственно-разнесенных узлов.

Однако, данная метрика не учитывает особенности структуры линии передачи данных как системы и применяемые в составе линии механизмы повышения надежности, а также не учитывается вероятность перехода линии из исправного состояния в состояние восстановления и обратно.

Локальные периоды квазистационарности физических каналов могут быть определены как периоды исправного состояния физического канала  $T_{иск}$ , где  $p_{ош} < p_{ош, доп}$  и периоды восстановления физического канала  $T_{вк}$ , где  $p_{ош} > p_{ош, доп}$  (раздел 1.3). Периоды  $T_{иск}$  и  $T_{вк}$  чередуются, сменяя друг друга. Тогда, состояние физического канала исследуемой коммуникационной системы аппроксимируется моделью надежности технического элемента с восстановлением [18]. Тогда, для оценки величины надежности линия передачи данных должны использоваться критерии надежности восстанавливаемых систем [17, 18]:

- среднее время наработки на отказ;
- среднее время восстановления;

- параметр потока отказов (интенсивность отказов);
- интенсивность восстановления;
- функция готовности;
- функция простоя;
- коэффициент готовности;
- коэффициент простоя.

Маршруты передачи данных являются системами, состоящими из линий передачи данных. Следовательно, маршрут может быть представлен моделью надежности технического элемента (системы). При передаче данных непрерывность передачи информации является основным показателем работы, поэтому для таких линий может быть введен показатель в виде коэффициента готовности, оценивающий непрерывность передачи [2, 17]. Следовательно, применение коэффициента готовности в качестве весовой оценки (метрики) маршрута передачи данных исследуемой коммуникационной системы является обоснованным.

Таким образом, для доставки сообщений конечным абонентам в коммуникационной системе с нестационарными физическими каналами с длительными замираниями сигналов и различными в условиях приема на входах разнесенных узлов необходимо формирование маршрутов оптимизированных по критерию надежности, где метрика маршрута, определяется в пространстве показателей надежности элементов, составляющих маршрут и базируется на определении надежности физической среды и оценке готовности к участию в передаче данных узлов следующего перехода. Так как непрерывность передачи является одним из основных показателей работы коммуникационной системы, то в качестве критерия оценки надежности линий и маршрутов передачи данных, как систем, испытывающих отказы и восстановления, может быть использован коэффициент готовности (функция готовности). Следует учесть, что применение табличных методов маршрутизации при организации обмена данными с удаленными узлами накладывает ограничение на величину интенсивности возникновения событий изменения топологии системы. Следовательно, формируемые линии передачи данных должны содержать в своем составе механизмы, повышающие их надежность. Для формирования метрики маршрутов доставки сообщений требуется:

- разработать блочно-иерархическую структуру маршрута;
- разработать алгоритмы и модели функционирования элементов маршрута;
- выполнить синтез параметров надежности элементов, составляющих маршрут;
- разработать метод оценки надежности маршрута;
- определить критерий надежности маршрута.

Таким образом, в результате исследования существующих критериев оценки надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационных системах с потерями определено, что: формирование маршрутов в коммуникационной системе с нестационарной топологией должно выполняться по критерию надежности. Критерий надежности представляет собой композитную оценку, полученную в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений. Для оценки надежности маршрута доставки сообщений целесообразно использовать коэффициент готовности.

### 1.6. Выводы по главе

На основании, проведенных в первой главе, исследований сделаны следующий выводы:

1. Анализ особенностей среды распространения сигналов показал, что каналы связи, являются нестационарными в виду значительных случайных изменений показателей качества. Случайные изменения вероятностно-временных показателей качества среды создают условия, при которых непосредственное взаимодействие узлов является затрудненным, а в некоторых случаях невозможным. Определен период квазистационарности каналов исследуемой системы, длительность которого составляет:  $T_{\text{КСК}} = 15.5 \div 16.5$  мин. при среднеквадратическом отклонении  $\approx 4 \div 4.5$  мин. Таким образом, для решения задачи доставки сообщений конечным абонентам в условиях нестационарности среды обмена данными необходимо выполнять поиск каналов связи, удовлетворяющих заданным требованиям надежности. Оценка надежности каналов выполняется на основе взаимодействия узлов коммуникационной системы. Для обеспечения взаимодействия узлов необходимо выполнить функциональное разделение и определить алгоритмы использования каналов обмена данными. При отсутствии непосредственного взаимодействия доставка сообщений выполняется ретрансляцией пакетов данных по маршрутам до узла назначения.
2. В результате идентификации параметров качества среды распространения сигналов получено, что для оценки качества канала связи выбрана вероятность ошибки элемента сигнала. Для оценки качества обмена данными смежных узлов используется вероятность приема дискретного сообщения в текущем физическом канале от заданного смежного узла, относительно заданного порогового значения вероятности ошибки элемента сигнала. Для организации непосредственного информационного взаимодействия между парой смежных узлов в заданном физическом канале необходимо формирование прогнозируемой вероятностной оценки исправного состояния канала на заданном интервале времени, не

превышающем период квазистационарности физического канала. Прогнозируемая вероятностная оценка исправного состояния канала формируется каждым узлом для каждого смежного с ним узла.

3. В результате анализа методов и алгоритмов непосредственного взаимодействия узлов определено, что: для организации обмена данными между узлами в условиях нестационарности среды распространения сигнала необходимо формирование сред с различными свойствами, методами доступа и алгоритмами передачи данных, обеспечивающих взаимодействие узлов на разных этапах обмена данными. Среда с множественным конкурентным синхронным доступом по типу Slotted Aloha обеспечит командное взаимодействие смежных узлов. В ходе командного взаимодействия узлов определяются показатели надежности каналов связи. Среда с асинхронным доступом «точка-точка» по типу HDLC обеспечит взаимодействие пары смежных узлов при передаче полезных данных в каналах с наибольшей надежностью. Алгоритмы обмена данными, действующие в средах, поддерживают квитирование передаваемых данных.
4. В результате анализа топологии и методов формирования маршрутов доставки сообщений установлено, что коммуникационная система действует в условиях отсутствия выделенной подготовленной инфраструктуры управления информационными потоками, каждый узел функционально автономен и самостоятельно формирует линии передачи данных и определяет маршруты доставки сообщений. Взаимодействие между узлами выполняется по принципу «каждый с каждым». Узлы условно мобильны и коммуникационная система имеет самоорганизующуюся многосвязную нестационарную топологию типа «Mesh». Для минимизации времени на принятие решения о выборе маршрута необходимо использование проактивной таблично-ориентированной системы маршрутизации. Распространение информации о топологии коммуникационной системы целесообразно выполнять диффузным способом.
5. В результате исследования существующих критериев оценки надежности маршрутов доставки сообщений в коммуникационных системах с потерями определено, что: формирование маршрутов в коммуникационной системе с нестационарной топологией должно выполняться по критерию надежности. Критерий надежности представляет собой композитную оценку, полученную в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений. Для оценки надежности маршрута доставки сообщений целесообразно использовать коэффициент готовности.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБМЕНА ДАННЫМИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ

### 2.1. Анализ процесса обмена данными при непосредственном взаимодействии узлов

Обмен данными между узлами исследуемой коммуникационной системы осуществляется в условиях пространственной и временной вариативности параметров качества принимаемых сигналов и высокой зашумленности физической среды. Организация взаимодействия узлов в заданных условиях приводит к необходимости использования множества физических каналов, сменяющих друг друга в случае невозможности выполнить обмен данными на выбранном канале [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15]. Исследуемая коммуникационная система обеспечивает обмен данными между узлами [91], действующими в различных условиях приема сигналов. Следовательно, не представляется возможным определить единый канал, в котором качество сигналов, принимаемых пространственно-разнесенными узлами, удовлетворяло бы заданным требованиям надежности на заданном интервале времени. Для организации обмена данными каждый узел выполняет периодическую оценку качества принимаемых от соседних узлов сигналов и выполняет отбор каналов, обладающих наилучшими показателями качества в заданном интервале времени [41, 42].

Для организации взаимодействия узлов физические каналы разделим на группы по назначению. Тогда, процесс передачи данных между соседними узлами можно функционально разбить на три этапа:

- установление соединения;
- запрос узла следующего перехода для передачи данных;
- передача данных.

Следовательно, для выполнения процедуры установления соединения между соседними узлами из общего ресурса физических каналов  $E$ , доступных узлам, можно выделяется подмножество каналов установления соединения [14]:

$$E_{yc} \in E. \quad (2.1.1)$$

Тогда, попытки взаимодействия любой пары соседних узлов в момент времени  $t_i$  выполняются в канале активном в момент времени  $t_i$  физическом канале  $e_{yc,j}$ , где:

$$e_{yc,i} \in E_{yc}. \quad (2.1.2)$$

Для обеспечения взаимодействия узлов в условиях нестационарности каналов  $E$  по истечению периода активности  $T_k$  все узлы синхронно выполняют переход на следующий

активный канал. Очевидно, список каналов  $E_{УС}$  и порядок их использования содержатся в настройках всех узлов. Ограничение по времени использования  $T_K$  активного канала  $e_{УС.i}$  и заданный алгоритм смены каналов определяют синхронный метод доступа к среде. На основе  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  между узлами формируется единая постоянная среда установления соединения. В случае неудачной попытки выполнения установления соединения, вызывающий узел повторит попытку на одном из следующих каналов  $E_{УС}$ . Узлы являются источниками потоков сообщений, возникновение которых аппроксимируется законом Пуассона. Следовательно, доступ к среде установления соединения носит конкурентный характер по типу синхронной Aloha [14,22]. В виду нестационарности каналов  $E_{УС}$  среда установления соединения используется для обмена коротким управляющими кадрами, что увеличивает вероятность их успешного приема. Взаимодействие в среде установления соединения позволяет каждому узлу выполнять сбор статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов и определять наборы каналов передачи данных, отвечающих заданным требованиям качества.

Синхронизация узлов осуществляется внешней синхронизирующей системой такой, как ГЛОНАСС [92, 93, 94]. Навигационное сообщение синхронизирующей системы представляет собой последовательность, непрерывно повторяющихся, суперкадров, содержащих строки. Строки кадра передаются непрерывно, следуя друг за другом, с периодом 2 с. и содержат навигационные данные и метки времени [92, 93, 94]. Это дает возможность выполнять синхронизацию узлов, а также вычислять активный канал  $e_{УС.i}$ , относительно передаваемой метки времени независимо от момента подключения узла к коммуникационной системе.

Определение показателя надежности передачи данных в каналах  $E_{УС}$ , позволяет сформировать множество каналов для выполнения процедуры передачи данных:

$$E_{ПД} \in E. \quad (2.1.3)$$

Узлы сети ведут мониторинг качества принимаемых от соседних узлов сигналов в различных каналах  $E_{УС}$ . Полученные статистические данные позволяют осуществить выбор каналов передачи данных, обладающих наилучшими (допустимыми) параметрами качества. Каналы  $E_{ПД}$  выбираются вблизи каналов  $E_{УС}$  с целью минимизировать расхождения их характеристик, что позволяет сделать допущение о схожести флуктуационных процессов, протекающих в физических каналах, условиях распространения, приема и качества, принимаемых в смежных каналах  $e_{УС.i}$  и  $e_{ПД.i}$  сигналов.

Для передачи данных выбирается каналы подмножества  $E_{ПД}$ , имеющие наилучшие (допустимые) характеристики принимаемого сигнала на входе принимающего узла. Каналы  $E_{ПД}$  используются для передачи блоков полезных данных в режиме индивидуального вызова. Группа каналов:

$$e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}, \quad (2.1.4)$$

образованных каналами передачи данных, отвечающих заданным требованиям надежности, формирует среду передачи данных. Взаимодействие в среде передачи данных выполняется в режиме индивидуального вызова при асинхронном доступе к среде. Функциональное разделение ресурса каналов  $E$  на группы установления соединения  $E_{\text{УС}}$  и передачи данных  $E_{\text{ПД}}$  создает возможность независимого взаимодействия соседних узлов при обмене служебными и полезными данными. При таком использовании ресурса каналов узлы, установившие соединение и выполняющие обмен данными в среде передачи данных, сохраняют способность выполнять обмен служебным трафиком, вести мониторинг состояния каналов и поддерживать отношения соседства.

Таким образом, в результате анализа процесса обмена данными при непосредственном взаимодействии узлов получено, что: процесс обмена данными между соседними узлами 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. Среда установления соединения обеспечивает установление отношений соседства, командное взаимодействие соседних узлов и сбор статистических данных качества принимаемых сигналов. Доступ к среде установления соединения синхронный конкурентный. Среда передачи данных обеспечивает передачу полезных данных с наилучшим качеством для каждой пары соседних узлов. Доступ к среде передачи данных асинхронный «точка-точка».

## 2.2. Синтез структуры узла исследуемой коммуникационной системы

Исходя из условий функционирования узлов исследуемой коммуникационной системы и заданного функционального разделения ресурса каналов (раздел 2.1), предложена структурная схема узла исследуемой коммуникационной системы (рисунок 2.2.1), где физический уровень модели узла представлен приемопередающими модулями среды установления соединения и среды передачи данных.

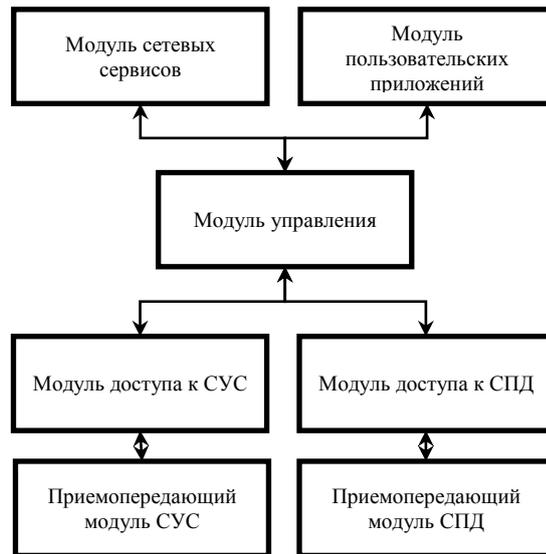


Рисунок 2.2.1 Структурная схема узла исследуемой коммуникационной системы; СУС – среда установления соединения; СПД – среда передачи данных

Наличие двух независимых модулей обеспечивает возможность независимой передачи служебных команд, оценки качества сигналов, принимаемых от соседних узлов в каналах  $\{e_{УС.i}\} \in E_{УС}$ , образующих среду установления соединения с множественным доступом, поддержку отношений соседства и обмен полезными данными в каналах  $\{e_{ПД.i}\} \in E_{ПД}$ , образующих среду передачи данных «точка-точка». На рисунке 2.2.2 показана схема взаимодействия узлов исследуемой коммуникационной системы.

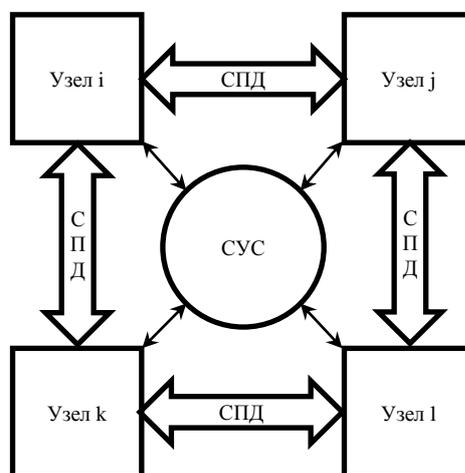


Рисунок 2.2.2 Схема взаимодействия узлов исследуемой коммуникационной системы; СУС – среда установления соединения; СПД – среда передачи данных

Модуль доступа к среде установления соединения обеспечивает выполнение следующих операций [12, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 30, 31, 32]:

- поддержка алгоритма синхронной смены физических каналов  $E_{УС}$  среды передачи данных;
- определение текущего активного канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  относительно поступающей в сигнал синхронизации метки времени;

- обеспечение синхронного конкурентного доступа к среде установления соединения;
- формирование кадров среды установления соединения, их передача и прием в соответствии с заданным алгоритмом обмена данными при индивидуальной или широковещательной адресации;
- обеспечение обмена данными в соответствии с заданным алгоритмом;
- управление доступом к среде установления соединения в зависимости от её состояния;
- определение качества сигналов, принимаемых от соседних узлов в заданных каналах  $\{e_{ус.i}\} \in E_{ус}$ ;
- поддержка трасс установления соединения.

Модуль доступа к среде передачи данных выполняет следующие функции [12, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 30]:

- поддержка алгоритма выбора физических каналов  $\{e_{пд.i}\} \in E_{пд}$  с наилучшим качеством приема сигналов соседнего узла;
- управление доступом к среде передачи данных;
- обеспечение асинхронного доступа к среде передачи данных в режиме «точка-точка»;
- управление передачей данных;
- формирование кадров среды передачи данных, их передача и прием в соответствии с заданным алгоритмом обмена данными при индивидуальной адресации;
- обеспечение обмена данными в соответствии с заданным алгоритмом;
- определение качества сигналов, принимаемых от соседних узлов в заданных каналах  $\{e_{пд.i}\} \in E_{пд}$ ;
- поддержка трасс передачи данных.

Для осуществления обмена данными необходимо, что бы модуль управления выполнял следующие функции:

- обеспечение взаимодействия модулей уровня приложений с модулями канального уровня;
- управление работой модулей установления соединения и передачи данных;
- прием и обработку сигналов внешней синхронизирующей системы;
- передача модулю установления соединения команд выбора текущего канала и времени начала его использования;
- управление процессом установления соединения;
- управление процессом передачи данных;
- управление сеансами установления соединения и передачи данных;

- поддержка отношений соседства формирование и актуализация базы данных соседних узлов, содержащую информацию о качестве принимаемых от соседних узлов сигналов в различных физических каналах  $e_{uc,i} \in E_{uc}$ .

Уровень приложений представлен модулями сервисов и приложений пользователя. В свою очередь модуль сетевых сервисов отвечает за:

- определение топологии коммуникационной системы;
- построение таблиц маршрутизации;
- определение событий изменения топологии коммуникационной системы.

Модуль пользовательских приложений является источником и назначением потоков данных.

Таким образом, синтезирована структура узла исследуемой коммуникационной системы. Получена взаимосвязь элементов обеспечивающих формирование линий передачи данных, составляющих маршрут доставки сообщений. Определены элементы узла, их функции и взаимосвязи с другими элементами. Полученная структура узла нацелена на формирование линий передачи данных, обеспечивающих обмен данными между соседними узлами в условиях нестационарности параметров качества физических каналов. Наличие двух независимых модулей доступа к средам установления соединения и передачи данных обеспечивает:

- определение качества физических каналов при приеме сигналов соседних узлов;
- обмен служебными сообщениями узлов с различными условиями приема сигналов;
- установление и поддержку отношений соседства узлов;
- обмен полезными данными пары соседних узлов в среде с наилучшими показателями качества;
- формирование для каждого отношения соседства адаптивных линий передачи данных.

### **2.3. Идентификация параметров взаимодействия узлов в нестационарной среде установления соединения**

Нестационарность параметров качества физических каналов исследуемой коммуникационной системы и различия в условиях приема пространственной разнесенных узлов приводят к необходимости разделения процесса обмена данными соседних узлов на несколько этапов, первым из которых является установление соединения (раздел 2.1).

Процедура установления соединения представляет собой часть процесса обмена командами управления. Обмен кадрами управления выполняется в среде установления соединения, которая образованна физическими каналами  $E_{uc} \in E$  (раздел 2.2). Тогда, для

формирования между соседними узлами линии передачи данных по критерию надежности необходимо определить зависимости задержки обмена управляющими данными при синхронном конкурентном методе доступа к среде, принятом базовом алгоритме обмена данными с квитированием принимаемых сообщений в условиях действия мешающих факторов.

Для формирования линии передачи данных среда установления соединения должна обеспечивать выполнение следующих процессов:

- обнаружение соседних узлов,
- обмен управляющими данными между соседними узлами в индивидуальном и широковещательном режимах адресации,
- сбор статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов в каналах  $\{e_{yc,i}\} \in E_{yc}$ .

В силу нестационарности параметров физических каналов, а также различий помеховой обстановки и условий приема сигналов на входах пространственно-разнесенных узлов, для взаимодействия в среде установления соединения узлы используют кадры управления (приложение А.1) и список каналов  $E_{yc}$ , доступ к которым выполняется синхронно всеми узлами коммуникационной системы на основе конкуренции (раздел 2.1) [14, 15, 16, 19, 22, 23, 31, 32, 33, 41, 42, 95]. Среда установления соединения образует широковещательный домен и обеспечивает обмен данными между соседними узлами вне зависимости от действия сосредоточенных по частоте и времени мешающих факторов и различий в условиях приема пространственно-разнесенных узлов.

Для взаимодействия в среде установления соединения в момент времени  $t_i$  все узлы используют текущий активный канал  $e_{yc,i} \in E_{yc}$ . Длительность активности канала  $e_{yc,i} \in E_{yc}$  составляет  $T_K$ . По истечении  $T_K$  все узлы синхронно переходят на следующий активный канал. Подобная организация позволяет обеспечить взаимодействие узлов в условиях нестационарности параметров физических каналов и различий в условиях приема сигналов и помеховой обстановки пространственно-разнесенных узлов.

Доступ к активному физическому каналу также выполняется синхронно [41, 42] с началом временного слота  $T_{сл.сус}$ , на которые разделяется все время канала  $T_K$ . Синхронный доступ к среде установления соединения выполняется требуется ввести понятие временного слота  $T_{сл.сус}$ . Тогда, время активности канала:

$$T_K = s * T_{сл.сус}, \quad (2.3.1)$$

где  $s$  - количество слотов канала  $e_{yc,i} \in E_{yc}$ . Слот с номером 0 используется всеми узлами для настройки на текущий активный канал. Последующие слоты с номерами  $(1 \div s)$  используются узлами для передачи кадров управления.

Исходя из условий синхронного доступа, кадры управления, передаваемые в среде установления соединения, имеют фиксированный формат (приложение А.1) с длительностью передачи, не превышающей длительность слота:

$$T_{\text{кадр.СУС}} < T_{\text{сл.СУС}} \quad (2.3.2)$$

При попытке установления соединения [96, 97] узел отправляет кадр вызова, используя слот с номером  $j$ , где  $1 \leq j \leq s - 1$ . Успешность попытки вызова подтверждает отправкой кадра – квитанции вызываемым узлом в слоте, следующем непосредственно за слотом вызова,  $j + 1$  канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ . Следовательно, процедура установления соединения состоит из двух последовательно передаваемых кадров – транзакции одноадресного вызова:

$$T_{\text{тр.УС}} = 2 * T_{\text{сл.СУС}} \quad (2.3.3)$$

Синхронное подключение всех узлов к текущему активному каналу  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  позволяет соседним узлам прослушивать передаваемые в среде кадры, выполнять их прием и обработку, и использовать для получения статистических данных качества принимаемых сигналов.

В состав механизма базового доступа к среде установления соединения включены функции определения занятости среды и передача кадров с р-настойчивостью [19, 20, 23]. При обнаружении в среде кадров вызова, адресованных другим узлам, текущий узел приостанавливает отсчет ожидания слота попытки передачи на время выполнения процедуры вызова длительностью  $T_{\text{тр.УС}}$  (2.3.3).

На рисунке 2.3.1 показана схема базового механизма доступа к среде установления соединения в режиме одноадресного вызова.

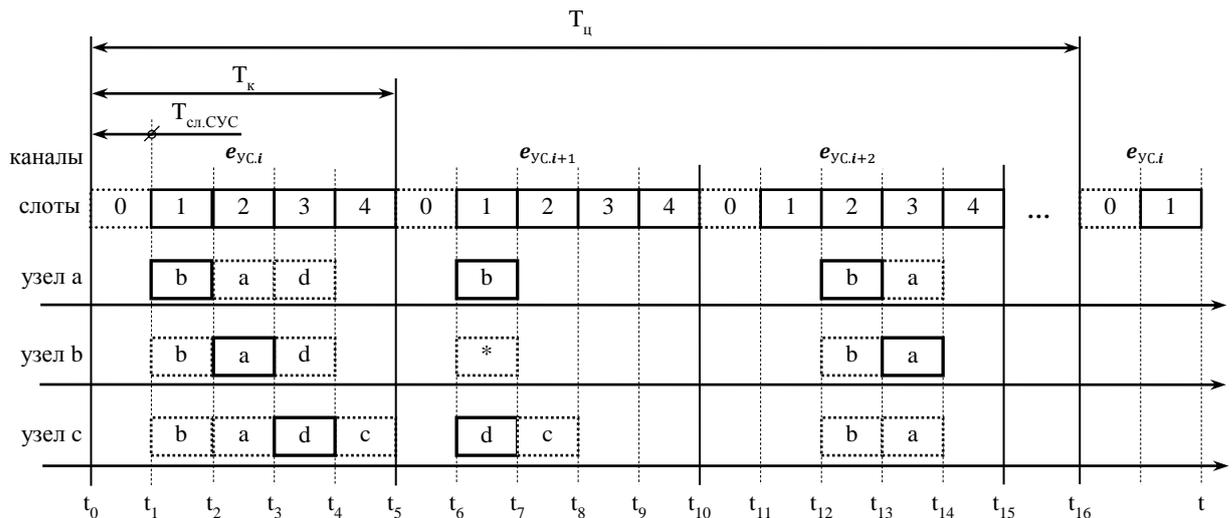


Рисунок 2.3.1 Схема базового доступа к среде установления соединения в режиме одноадресного вызова;  $a, b, c$  – адреса узлов;  $T_{\text{к}}$  – период активности канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ ;  $T_{\text{сл.СУС}}$  – длительность слота;  $T_{\text{ц}}$  – длительность цикла повторного использования канала; количество слотов в канале  $s = 5$

Соседние узлы  $M = \{a, b, c\}$  ( $M \in N$ , где  $N$  – множество узлов коммуникационной системы) осуществляют попытки обмена данными в следующие моменты времени:

- $t_0$  (слот 0): узлы выполняют подключение и настройку на текущий активный канал в течение слота 0;
- $t_1$  (слот 1): узел  $a$  предпринимает попытку установить соединение с узлом  $b$ ; узел  $c$  определяет, что среда занята на время  $T_{тр.УС}$  и использует полученный кадр для оценки качества канала;
- $t_2$  (слот 2): узел  $b$ , получив кадр вызова, передает ответный кадр, содержащий подтверждение или отказ установления соединения;
- $t_3$  (слот 3): узел  $c$  также выполняет передачу кадра вызова, адресованного узлу  $d \notin M$ ;
- $t_4$  (слот 4): узел  $d$  выполняет отправку ответного управляющего кадра;
- $t_5$  (слот 0): всеми узлами коммуникационной системы синхронно выполняется смена канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ ; текущим каналом становится канал  $e_{УС.i+1}$ .
- $t_6$  (слот 1): узлы  $a, c$  одновременно предпринимаяют попытку доступа к среде; на входе принимающего узла  $b$  возникает интерференция сигналов;
- $t_7$  (слот 2): узел  $a$  ожидает поступления кадра подтверждения; в результате действия помехи узел  $b$  не принял кадр вызова узла  $a$ ;
- при отсутствии в течение слота 2 кадра подтверждения узел  $a$  фиксирует ошибку установления соединения и переходит в режим задолженного узла, вычисляет время выполнения повторной попытки установления соединения и ожидает его наступления.
- узел  $d \notin M$ , получив запрос соединения от узла  $c$ , отправляет кадр подтверждения вызова, который успешно принимается узлом  $c$ .
- $t_8$  (слот 2): соединение между  $c$  и  $d$  считается установленным;
- $t_{12}, t_{13}$  (слоты 2, 3): узлы  $a$  и  $b$  в ходе повторной попытки устанавливают соединение.

Количество повторных попыток ограничивается заданным предельным значением. Каждая неудачная попытка увеличивает значение счетчика ошибок передачи. Тогда, время выполнения успешного индивидуального вызова равно:

$$T_{УС} = T_{зУС} + T_{тр.УС}, \quad (2.3.4)$$

где  $T_{зУС}$  – задержка установления соединения.

Узлы конкурируют за доступ к среде установления соединения, создавая интерференцию сигналов, длительностью  $T_{кадр.СУС}$ . Положим, что в течение  $T_{сл.СУС}$  через среду установления соединения успешно может быть пропущен только один кадр. Следовательно, среду

установления соединения можно представить в виде системы массового обслуживания, соответствующей модели M/M/1 [22, 23, 98, 99].

Находясь в задолженном состоянии узел повторяет попытку с фиксированной вероятностью  $q_3$  в каждом последующем слоте (исключая слоты с номерами 0 и  $s$ ). Число слотов, от отказа до момента, когда узел выполнит успешную передачу, есть случайная величина с геометрическим распределением, принимающая значение  $i \geq 1$  с вероятностью:

$$p = q_3(1 - q_3)^{i-1}. \quad (2.3.5)$$

Пусть  $m = |M|$  – количество узлов в подмножестве соседних узлов  $M$ . Пусть  $n$  – количество задолженных узлов в начале заданного слота:

$$0 \leq n \leq m. \quad (2.3.6)$$

Каждый из  $m - n$  остальных (свободных) узлов будет выполнять попытки передачи с вероятностью  $q_c$ . Поскольку моменты поступления требований обслуживания распределены по пуассоновскому закону со средним  $w/m$ , где  $w$  – интенсивность поступления требований обслуживания, то вероятность не поступления новых требований равна  $e^{-w/m}$  [22]. Следовательно, вероятность того, что узел, не имеющий задолженности, выполнит попытку передачи в текущем слоте, равна:

$$q_c = 1 - e^{-w/m}. \quad (2.3.7)$$

Пусть  $Q_c(i, (m - n))$  – вероятность того, что  $i$  узлов ( $i \leq (m - n)$ ), не имеющих задолженности, в текущем слоте получают требование обслуживания. Пусть  $Q_3(i, n)$  – вероятность того, что  $i$  узлов ( $i \leq n$ ), имеющих задолженность выполняют попытку повторной передачи в текущем слоте. Тогда:

$$Q_c(i, (m - n)) = \binom{m-n}{i} (1 - q_c)^{m-n-i} q_c^i, \quad (2.3.8)$$

$$Q_3(i, n) = \binom{n}{i} (1 - q_3)^{n-i} q_3^i. \quad (2.3.9)$$

На рисунке 2.3.2. показан граф состояний группы соседних узлов с конкурентным доступом к среде установления соединения.

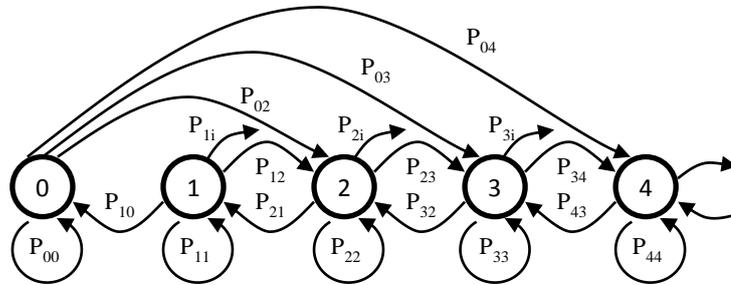


Рисунок 2.3.2 Граф состояний группы узлов с конкурентным доступом к среде установления соединения;  $P_{ij}$  – вероятности перехода системы из состояния  $i$  в состояние  $j$

Переход системы узлов  $M$  из состояния  $n$ , где  $n$  – количество задолженных узлов, в состояние  $n + i$  происходит при следующих значениях  $i$ :

- $2 \leq i \leq (m - n)$ , когда  $i$  узлов, не имеющих задолженности, одновременно выполняют попытку передачи кадра и переходят в задолженное состояние;
- $i = 1$ , когда один узел, не имеющий задолженности, при передаче кадра конфликтует с задолженными узлами, также выполняющими передачу кадра в текущем слоте;
- $i = 0$ , когда выполнена успешная попытка узлом, не имеющим задолженности, или неудачная попытка несколькими задолженными узлами, передать кадр в текущем слоте;
- $i = -1$ , когда происходит уменьшение количества задолженных узлов при условии, что только один из них выполняет попытку передачи кадра, при этом нет поступления новых требований обслуживания.

На основе графа состояний (Рис. 2.3.2) получена система уравнений, определяющая, вероятность перехода системы узлов  $M$  из состояния  $n$  в состояние  $n + i$  [96, 97]:

$$P_{n,n+i} = \begin{cases} Q_c(i, (m - n)), & 2 \leq i \leq (m - n), \\ Q_c(1, (m - n))[1 - Q_3(0, n)] & i = 1, \\ Q_c(1, (m - n))Q_3(0, n) + Q_c(0, (m - n))[1 - Q_3(1, n)], & i = 0, \\ Q_c(0, (m - n))Q_3(1, n), & i = -1. \end{cases} \quad (2.3.10)$$

Решение системы уравнений (2.3.10) определяет зависимость переходной вероятности  $P_{n,n+1}$  системы из состояния  $n$  в состояние  $n + 1$ .

Пусть количество задолженных узлов в системе может уменьшаться за один переход не более чем на один. Тогда, вероятность нахождения системы в состоянии с  $n$  задолженными узлами, из общего числа узлов  $m$ , определяется стационарными  $p_i$  и переходными  $P_{i,n}$  (2.3.10) вероятностями, связанными зависимостью [22, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102]:

$$p_n = \sum_{i=0}^{n+1} p_i P_{in}, \quad (2.3.11)$$

где  $\sum_{n=0}^m p_n = 1$ ;  $\sum_{j=0}^m P_{k,j} = 1$ ;  $P_{k,j} \geq 0$ ;  $k = \overline{1, m}$ .

На основе (2.3.11) получены стационарные вероятности системы  $M$  узлов при различных значениях интенсивности поступления требований обслуживания. Это позволяет определить среднее количество узлов с задолженностью на начало слота:

$$D = \sum_{i=0}^m p_i n_i. \quad (2.3.12)$$

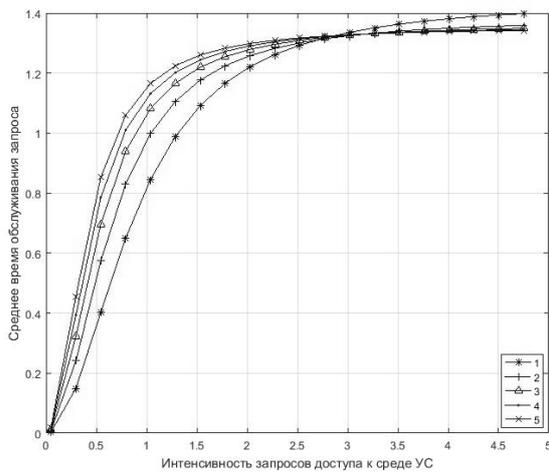
Пусть интенсивность прохождения кадров через среду установления соединения определяется зависимостью:

$$w_{\text{сус}} = \frac{1}{T_{\text{сл.сус}}} * \frac{s-1}{s}, \quad (2.3.13)$$

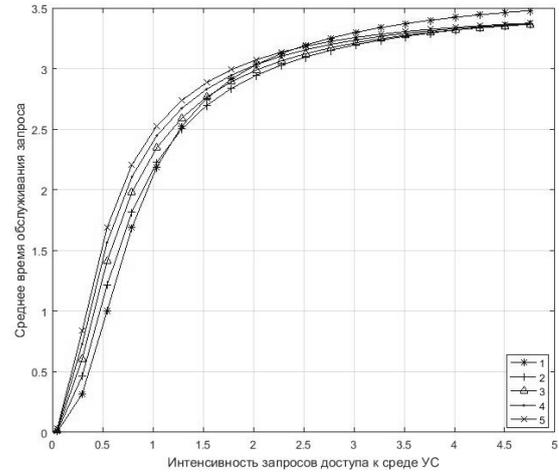
где  $T_{сл.СУС}$  – длительность слота среды установления соединения;  $s$  – количество слотов активного канала. На основе (2.3.12) определена зависимость среднего времени задержки передачи кадра данных в среде установления соединения при различных значениях интенсивности поступления требований обслуживания:

$$T_{з.СУС} = \frac{D}{w_{СУС}}. \quad (2.3.14)$$

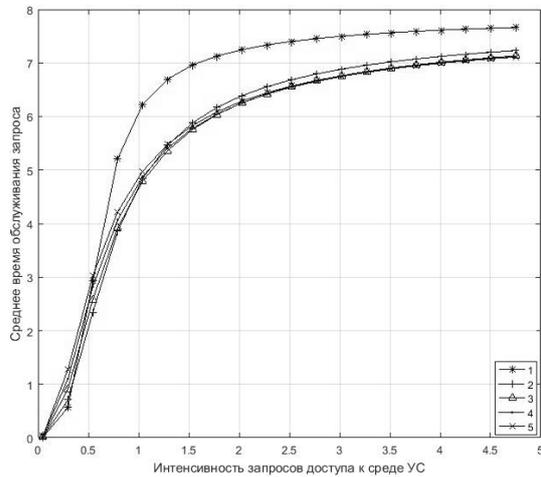
Результаты математического моделирования процессов установления соединения между соседними узлами множества  $M$  показаны на рисунке 2.3.3.



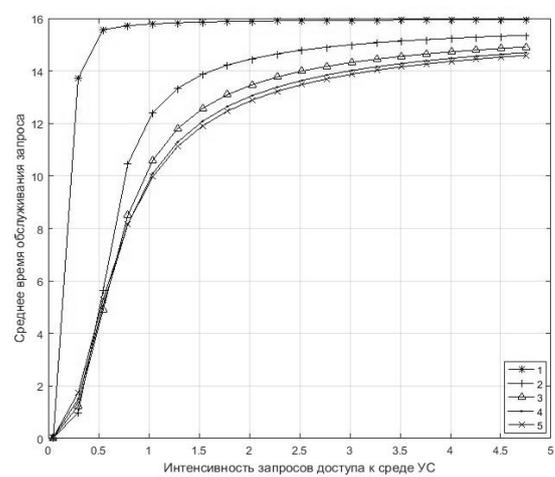
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.3.3 Среднее время задержки обслуживания в среде установления соединения; Здесь:  $m$  – количество узлов, конкурирующих за среду:  $m = 2$  (а),  $m = 4$  (б),  $m = 8$  (в),  $M = 16$  (г);  $q_3$  – вероятность передачи кадра задолженным узлом:  $q_3 = 1/3$  (1),  $q_3 = 1/6$  (2),  $q_3 = 1/9$  (3),  $q_3 = 1/12$  (4),  $q_3 = 1/15$  (5)

Численные результаты математического моделирования задержки установления соединения приведены в таблице А.2.1 (приложение А.2).

Увеличение количества узлов  $m$  приводит к росту конфликтов в среде, количества задолженных узлов, задержки передачи кадров через среду установления соединения. Так, максимальное значение задержки при  $q_3 = 1/9$ , полученное в ходе моделирования, для различных значений узлов  $m$  составило:

- $m = 2: T_{з.СУС} = 1.35с.$ ;
- $m = 4: T_{з.СУС} = 3.35с.$ ;
- $m = 8: T_{з.СУС} = 7.08с.$ ;
- $m = 16: T_{з.СУС} = 14.4с.$ .

Рост интенсивности поступления запросов также приводит к росту интерференции с соседними узлами и увеличению времени задержки  $T_{з.СУС}$ . Так, для  $m = 4$  и  $q_3 = 1/9$  при изменении  $\lambda = (0 \div 4.5)$  задержка составила  $T_{з.СУС} = (0 \div 3.32)с.$

С ростом интенсивности обращений к среде наблюдается увеличение задержки обслуживания. Дальнейшее повышение интенсивности поступления запросов обращения к среде приводит к переходу узлов в задолженное состояние, в котором повторные попытки передачи кадров данных выполняются с заданной вероятностью  $q_3$  (Рис. 2.3.3).

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что скорость роста задержки  $T_{з.СУС}$  зависит от вероятности повторной попытки передачи кадра. При малых значениях интенсивности обращений к среде наиболее предпочтительны большие значения вероятности повторной попытки передачи кадров данных. Однако, с ростом интенсивности меньший рост задержки наблюдался в экспериментах с меньшими значениями вероятности повторных попыток передачи. Так:

при  $\lambda = 0.25$ :

- $q_3 = \frac{1}{3}; T_{з.СУС} = 0.5с.$ ;
- $q_3 = \frac{1}{15}; T_{з.СУС} = 1с.$ ;

при  $\lambda = 1$ :

- $q_3 = \frac{1}{3}; T_{з.СУС} = 6.2с.$ ;
- $q_3 = \frac{1}{15}; T_{з.СУС} = 4.8с.$

Анализ полученных результатов показывает, что на величину задержки передачи кадра через среду установления соединения  $T_{з.СУС}$  оказывают влияние следующие факторы:

- вероятность потери кадра в результате действия помех;
- количество узлов, конкурирующих за среду установления соединения;
- интенсивность требований доступа к среде установления соединения;

– вероятность повторной попытки передачи задолженным.

Таким образом, для реализации процедуры обмена данными в среде установления соединения следует использовать механизмы перераспределения потоков данных по альтернативным линиям передачи данных и выполнять адаптивный выбор вероятности повторной попытки передачи.

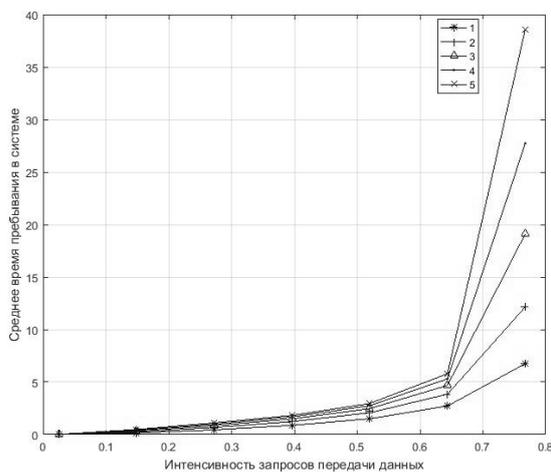
Полученное время задержки  $T_{з.сус}$  определяет период, с которым среда установления соединения способна обрабатывать запросы доступа при заданных значениях  $w$ ,  $m$  и  $q_3$ . Следовательно, время задержки  $T_{з.сус}$  дает возможность определить интенсивность обработки требований обслуживания, приходящуюся на каждый узел, подключенный к среде установления соединения:

$$w_{сус.i} = \frac{w_{сус}}{m}. \quad (2.3.15)$$

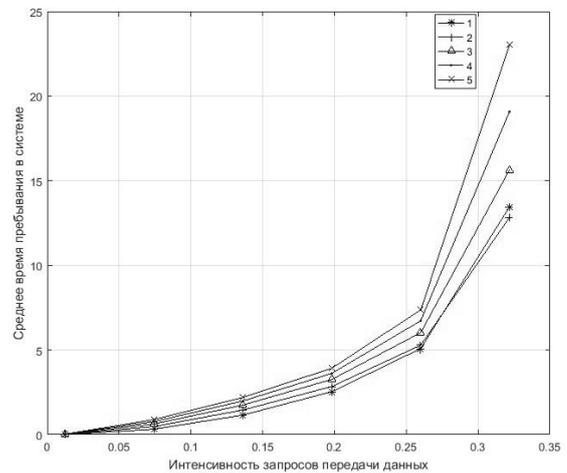
Для определения среднего времени задержки индивидуального вызова, поступившего в узел  $i$ , используем [99]:

$$T_{зус} = \frac{1/w_{сус.i}}{1-w_i/w_{сус.i}}. \quad (2.3.16)$$

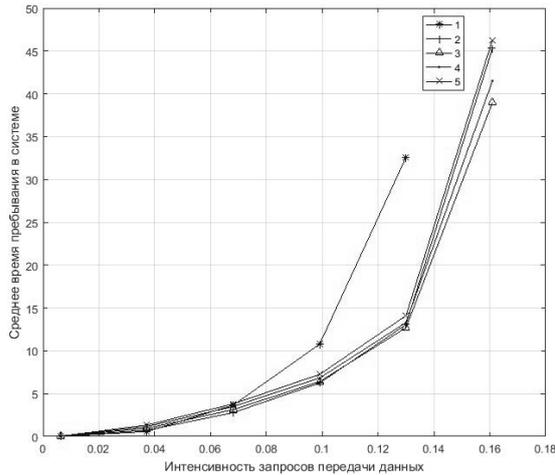
На рисунке 2.3.4 приведены результаты моделирования среднего времени  $T_{зус}$  при различных значениях  $w_i$ ,  $q_3$  и различных значениях интенсивности обработки запросов доступа к среде установления соединения.



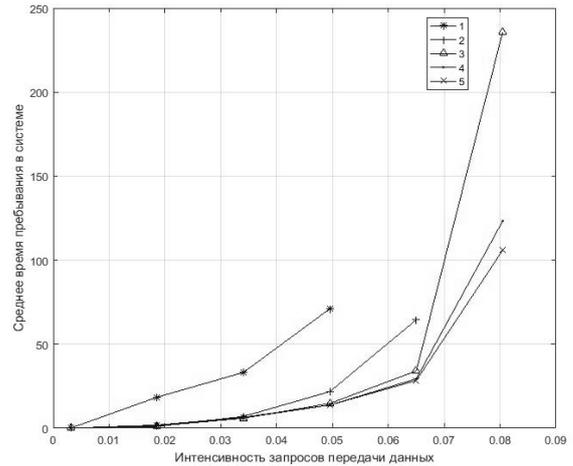
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.3.4 Среднее время задержки установления соединения;  $m$  – количество узлов, конкурирующих за среду:  $m = 2$  (а),  $m = 4$  (б),  $m = 8$  (в),  $m = 16$  (г);  $q_3$  – вероятность передачи кадра задолженным узлом:  $q_3 = 1/3$  (1),  $q_3 = 1/6$  (2),  $q_3 = 1/9$  (3),  $q_3 = 1/12$  (4),  $q_3 = 1/15$  (5)

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- среднее время задержки индивидуального вызова  $T_{зус}$  пропорционально интенсивности поступления требований обслуживания  $w$ , количеству узлов множества  $M$  и величины вероятности повторной попытки передачи  $q_3$ ; так при  $w_i = 0.1$ ;  $q_3 = 1/6$ :  $T_{зус} \leq 0.3$ с. при  $\{M\} = 2$ ;  $T_{зус} \leq 1$ с. при  $\{M\} = 4$ ;  $T_{зус} \leq 6.5$ с. при  $\{M\} = 8$ ;  $T_{зус} \rightarrow \infty$  при  $\{M\} = 16$ ;
- снижение вероятности повторной попытки передачи в следующем слоте уменьшает вероятность возникновения отказа, но увеличивает  $T_{зус}$ ; так при  $\{M\} = 4$ ;  $w_i = 0.1$ :  $T_{зус} \leq 1.1$ с. при  $q_3 = 1/3$ ;  $T_{зус} \leq 1.3$ с. при  $q_3 = 1/6$ ;  $T_{зус} \leq 1.6$ с. при  $q_3 = 1/9$ ;  $T_{зус} \leq 1.8$ с. при  $q_3 = 1/12$ ;  $T_{зус} \leq 2$ с. при  $q_3 = 1/15$ ;
- для уменьшения  $T_{зус}$  следует использовать методы перенаправления информационных потоков на линии передачи данных, проходящие через множества узлов отличных от  $M$ ;
- величина вероятности повторной попытки передачи  $q_3$  должна выбираться с учетом динамики роста  $T_{зус}$  и скорости заполнения буфера задолженного узла.

Анализ процесса обмена данными на этапе установления соединения показывает, что на величину задержки установления соединения  $T_{зус}$  оказывают влияние:

- уровень фоновых помех,
- интенсивность поступления требований обслуживания  $w$  и количество узлов  $|M|$ , конкурирующих за среду, создающих интерференции сигналов в среде установления соединения
- величина вероятности повторной попытки передачи  $q_3$ .

Таким образом, для формирования оценки надежности трассы установления соединения и получены зависимости задержки установления соединения и интенсивности восстановления узлов при заданных условиях организации среды установления соединения: методе доступа к среде, алгоритме обмена данными и действии мешающих факторов: фоновых помех и интерференции сигналов соседних узлов.

Рост интенсивности фоновых помех снижает вероятность успешного выполнения попытки передачи кадра и приводит к росту количества задолженных узлов, что увеличивает время выполнения процедуры установления соединения. В случае если фоновая помеха сосредоточена в некотором физическом канале, то данная проблема решается сменой физического канала  $e_{y.c.i} \in E_{y.c}$  и повторными попытками передачи кадра данных (раздел 2.1). Количество повторных попыток и вероятность выполнения повторной попытки также оказывают влияние на величину задержки передачи данных или определения отказа канала.

В отличие от фоновых помех интерференция сигналов соседних узлов, возникающая при конкуренции за среду, не устраняется сменой физического канала. Рост интенсивности попыток передачи кадров и (или) увеличение количества узлов, конкурирующих за среду, также приводит к снижению вероятности успешного выполнения передачи кадров данных и, как следствие, к увеличению времени обмена данными. Управление интенсивностью передачи данных выполняется путем перераспределения потоков данных по альтернативным линиям передачи данных.

В результате идентификации параметров взаимодействия узлов в среде установления соединения определены основные параметры алгоритма обмена данными: время активности канала, длительность слота канала, количество слотов, длительность передачи кадра. Определена зависимость длительности транзакции установления соединения от параметров принятого алгоритма обмена данными и качества среды установления соединения. Минимальное время установления соединения составило 1.6с. Максимальная длительность процедуры установления соединения определяется качеством среды и количеством допустимых попыток. Определены предельные значения интенсивностей доступа к среде при различном количестве конкурирующих узлов и заданных вероятностях повторных попыток передачи данных задолженными узлами. Установлено, что среда установления соединения является восстанавливаемой системой. Определена длительность восстановления среды установления соединения.

## 2.4. Идентификация параметров взаимодействия узлов в нестационарной среде передачи данных

Взаимодействие узлов в среде установления соединения, образованной физическими каналами  $e_{ус.i} \in E_{ус}$ , позволяет осуществить выбор физических каналов  $e_{пд.i} \in E_{пд}$ , обладающих наилучшими (удовлетворительными) показателями качества обмена данными для каждого отношения соседства. При возникновении требования передачи данных вслед за успешным выполнением процедуры установления соединения узлы переходят к обмену данными на выбранных каналах среды передачи данных  $e_{пд.i} \in E_{пд}$ . В соответствии с принятой моделью использования ресурса физических каналов взаимодействие узлов в среде передачи данных выполняется в режиме «точка - точка» при асинхронном доступе к среде. Для формирования линии передачи данных адаптирующейся к изменениям состояния физической среды и определения параметров её метрики требуется определить зависимости выполнения транзакции передачи данных при изменениях качества среды передачи данных и заданном алгоритме обмена данными.

### 2.4.1. Анализ процедуры подготовки передачи данных

После установления соединения узлы выполняют подготовку передачи данных в заданном физическом канале  $e_{пд.i} \in E_{пд}$  в соответствии с назначенной ролью («лидер», «ведомый»). Доступ к среде передачи данных выполняется асинхронно в режиме соединения «точка-точка» [25,30, 35]. Для оценки времени нахождения узла в занятом состоянии необходимо определить среднее время выполнения процедуры подготовки передачи данных.

Пусть минимальным элементом времени канала передачи данных является время слота [14, 19, 32, 33]:

$$T_{сл.СПД} = T_{ОН} + T_{ППП} + T_{РС}, \quad (2.4.1.1)$$

где  $T_{ОН}$  – минимальное время, в течение которого физический уровень узла способен обнаружить несущую;  $T_{ППП}$  – наибольшее время переключения физического уровня с передачи на прием;  $T_{РС}$  – время распространения сигнала.

Пусть обмен данными в среде передачи данных выполняется с квитированием успешно принятых кадров. Узел, успешно принявший кадр данных, выполняет отправку кадра – квитанции спустя минимальный межкадровый интервал [14, 19, 20, 25, 30, 32, 33]:

$$T_{ММИ} = T_{ОПК} + T_{ФК} + T_{ППП} \approx T_{ФК}, \quad (2.4.1.2)$$

где  $T_{\text{ОПК}}$  – задержка физического уровня при приеме кадра и передаче его на МАС уровень;  $T_{\text{ФК}}$  – задержка при формировании кадра;  $T_{\text{ППП}}$  – наибольшее время переключения физического уровня с передачи на прием.

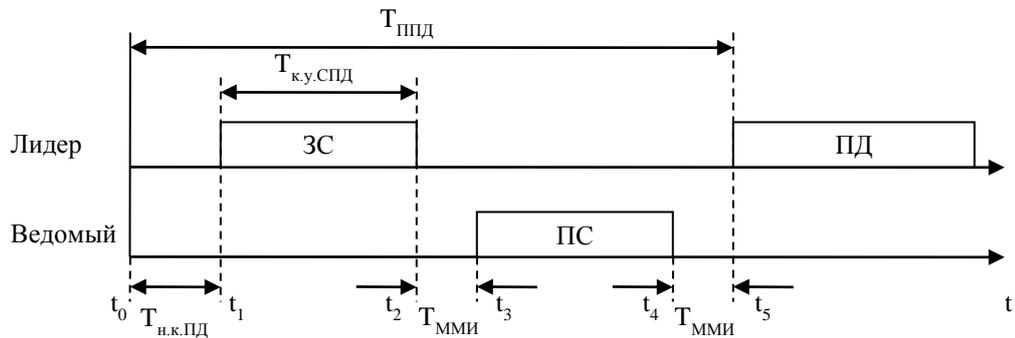


Рисунок 2.4.1.1 Схема выполнения процедуры подготовки передачи данных; ЗС – запрос соединения; ПС – подтверждение соединения; ПД – передача данных;  $T_{\text{ППД}}$  – длительность транзакции подготовки передачи данных;  $T_{\text{к.у.СПД}}$  – длительность кадра управления;  $T_{\text{н.к.ПД}}$  – время настройки на канал передачи данных;  $T_{\text{ММИ}}$  – минимальный межкадровый интервал

Процесс передачи блока данных в режиме индивидуального вызова основанном на протоколе двухточечного соединения [25, 30, 35] и показан на рисунке 2.4.1.1, где в момент времени:

- $t_0$ : узлы выполняют настройку на выбранный канал  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  в течение  $T_{\text{н.к.ПД}}$  в соответствии с принятыми ролями (“лидер”, “ведомый”);
- $t_1$ : лидер выполняет отправку кадра запроса соединения (ЗС) длительность  $T_{\text{к.у.СПД}}$  (приложение А.3);
- $t_2$ : ведомый узел завершает прием запроса соединения и переходит к его обработке;
- $t_3$ : спустя  $T_{\text{ММИ}}$  ведомый узел отвечает кадром подтверждения соединения (ПС), считает соединение на канале передачи данных установленным и переходит в режим ожидания передачи данных в течение  $T_{\text{о.д.СПД}}$ ; если в течении  $T_{\text{о.д.СПД}}$  ведомый узел не получил кадров управления или данных от лидера, то соединение на каналах передачи данных завершается;
- $t_4$ : при успешном обмене кадрами управления лидер завершает прием кадра подтверждения, считает соединение установленным;
- $t_5$ : лидер переходит к передаче блока данных.

В ходе выполнения процедуры подготовки передачи данных существует вероятность потери кадров запроса или квитанции. После отправки кадра ЗС лидер ожидает поступления кадра подтверждения соединения от ведомого узла в течении  $T_{\text{о.пс}}$ . В свою очередь ведомый после выполнения настройки на выбранный канал среды передачи данных ожидает кадра запроса соединения от лидера в течение  $T_{\text{о.зс}}$ . Величина периода ожидания  $T_{\text{о.зс}}$ , выполняемого ведомым, должна обеспечивать возможность выполнения  $r$  попыток ЗС:

$$T_{o.3c} = r * T_{o.пс}. \quad (2.4.1.3)$$

На основе принятого алгоритма, длительность попытки подготовки передачи данных равна сумме:

$$T_{ппд} = T_{ку.спд}(ЗС) + T_{мми} + T_{ку.спд}(ПС) + T_{мми} = 2 * T_{тр.у.спд}, \quad (2.4.1.4)$$

где  $T_{ку.спд}$  – длительность кадра управления среды передачи данных (приложение А.3);  $T_{мми}$  – минимальный межкадровый инетрвал;  $T_{тр.у.спд}$  – транзакция передачи кадра управления среды передачи данных:

$$T_{тр.у.спд} = T_{ку.спд} + T_{мми}. \quad (2.4.1.5)$$

При отсутствии кадра запроса в течение  $T_{o.3c}$  ведомый узел завершает процедуру подготовки передачи данных. В свою очередь, если лидер исчерпал все  $r$  попыток выполнить ЗС и не получил ПС, он также завершает процедуру подготовки передачи данных.

В случае успешного приема кадра ЗС ведомый отвечает кадром ПС и ожидает поступления кадра данных или кадров управления в течение  $T_{o.д.}$ . При отсутствии передачи кадра данных со стороны лидера ведомый узел завершает процедуру проверки соединения на канале передачи данных. Величина периода ожидания данных равна:

$$T_{o.д.} = r * T_{тр.пд}, \quad (2.4.1.6)$$

где  $r$  – допустимое количество повторных попыток передачи кадра данных. Длительность транзакции передачи кадра данных равна сумме:

$$T_{тр.пд.} = T_{кд} + T_{мми} + T_{ку.спд} + T_{мми}, \quad (2.4.1.7)$$

где  $T_{кд}$  – длительность передачи кадра данных (приложение А.3).

Для оценки надежности узла следующего перехода требуется определить величину средней задержки процесса подготовки передачи данных в условиях действия помех на входах узлов-участников соединения. При выполнении подготовки передачи данных лидер может выполнить  $l$  неудачных и одну успешную попытки (или также неудачную, после которой соединение завершается), при условии, что:

$$0 \leq l \leq (r - 1), \quad (2.4.1.8)$$

где  $r$  – предельное количество попыток выполнения процедуры подготовки передачи данных. Пусть  $Q_{пк}$  – вероятность потери кадра управления (ЗС или ПС) в результате действия помех в каналах среды передачи данных. Тогда, среднее время выполнения подготовки передачи данных:

$$T_{ппд,ср}(r) = T_{н.к.пд} + T_{тр.пд} + \sum_{l=0}^{r-1} [(Q_{пк} + P_{упк} * Q_{пк})^l * T_{тр.пд}], \quad (2.4.1.9)$$

где  $P_{упк} = 1 - Q_{пк}$  – вероятность успешной попытки передачи кадра;  $Q_{пк}$  – вероятность потери кадра управления (ЗС или ПС) в результате действия помех в каналах среды передачи данных.

Для моделирования среднего времени процедуры подготовки передачи данных на выбранном канале  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  использовались характеристики физического и канального уровней коммуникационной системы с радиодоступом [14] (приложение А.4) при следующих исходных данных:

- $Q_{\text{ПК}} = (0 \div 1)$  – вероятности потери кадра управления, шаг изменения 0.1;
- $r = (1 \div 8)$  – допустимое количество повторных попыток установления соединения, шаг изменения равен 1.

Получены зависимости задержки выполнения процедуры подготовки передачи данных  $T_{\text{ПД},\text{ср}}$  от вероятности потери кадров  $Q_{\text{ПК}}$  и допустимого количества повторных попыток выполнения процедуры  $r$  (рисунок 2.4.1.2).

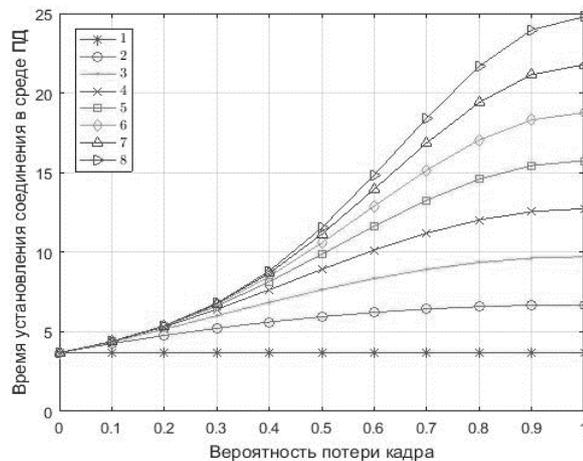


Рисунок 2.4.1.2 Среднее время выполнения процесса подготовки передачи данных; 1:  $r = 1$ ; 2:  $r = 2$ ; 3:  $r = 3$ ; 4:  $r = 4$ ; 5:  $r = 5$ ; 6:  $r = 6$ ; 7:  $r = 7$ ; 8:  $r = 8$

В таблице А.5.1 (приложения А.5) приведены численные результаты математического моделирования процесса подготовки передачи данных при различных значениях вероятности потери кадров  $Q_{\text{ПК}}$  и величины  $r$ .

Анализ результатов моделирования показывает, что среднее время выполнения подготовки передачи данных увеличивается с ростом числа возможных попыток и вероятности потери передаваемых кадров. Так, при  $r = 4$  (зависимость 4) и  $Q_{\text{ПК}} = 0.1$   $T_{\text{ПД},\text{ср}} = 4.38446\text{с.}$ , при  $Q_{\text{ПК}} = 0.8$   $T_{\text{ПД},\text{ср}} = 12.02345\text{с.}$

Таким образом, рост числа попыток передачи кадров данных повышает вероятность успешного выполнения процедуры обмена данными, при этом растет задержка выполнения процедуры. Для корректного выполнения процедуры обмена данными требуется установить значение  $r$ , соответствующее требованиям целевой функции, определяющей надежность и время обмена данными.

В результате выполнения моделирования процедуры подготовки передачи данных получены зависимости среднего времени выполнения транзакции передачи данных в условиях действия помех, особенностей механизма базового доступа к среде передачи данных и при заданных параметрах алгоритма обмена данными. Полученная зависимость  $T_{\text{ПД,ср}}$  используется для формирования оценки надежности узла следующего перехода (раздел 3.5).

С увеличением количества попыток  $r$  пропорционально растет среднее время выполнения и вероятность успешного завершения подготовки передачи данных. Однако, увеличение  $r$  должно быть ограничено допустимым временем выполнения процедуры, превышение которого означает отказ канала передачи данных. Вариативность параметров физической среды, выраженная в изменениях вероятности потери кадра, приводит к необходимости повышения надежности выполнения транзакции передачи данных, что должно быть учтено при разработке структуры линии передачи данных.

Полученные временные зависимости являются составляющими протокола передачи данных и необходимы для реализации имитационной модели коммуникационной системы (раздел 4.1).

#### 2.4.2. Анализ процедуры передачи данных

После завершения процедуры подготовки передачи данных узлы, переходят к передаче данных в заданном физическом канале  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$ . Поток передаваемых данных разбивается на отдельные блоки, инкапсулируемые в кадры среды передачи данных. В разделах 2.1 и 2.2 показано, что доступ к среде передачи данных выполняется в асинхронном режиме с квитированием передаваемых данных при двух точечном соединении узлов лидера и ведомого. На рисунке 2.4.2.1 приведена схема базового доступа к среде передачи данных в процессе передачи данных.

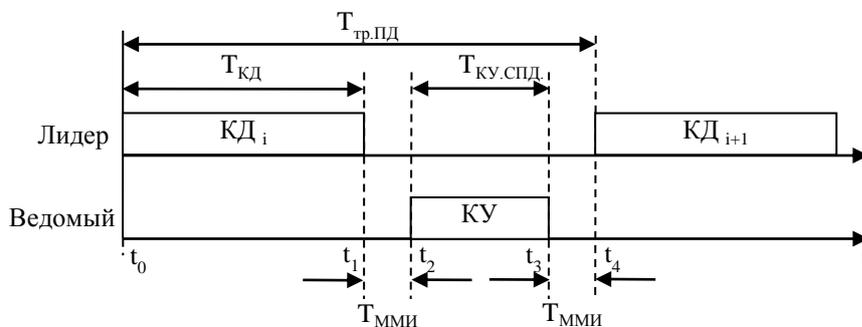


Рисунок 2.4.2.1 Схема базового доступа к среде передачи данных; КД – кадр данных; КУ – кадр управления;  $T_{\text{КД}}$  – длительность передачи кадра данных;  $T_{\text{КУ,СПД}}$  – длительность передачи кадра управления;  $T_{\text{ММИ}}$  – минимальный межкадровый интервал;  $T_{\text{тр.ПД}}$  – длительность транзакции передачи данных

При выполнении обмена данными в момент времени:

- $t_0$ : лидер выполняет передачу  $i$ -го кадра данных;
- $t_1$ : лидер переходит в режим ожидания кадра квитанции; длительность ожидания составляет  $T_{о.п.}$ ;
- $t_2$ : ведомый узел, получив кадр данных, формирует кадр квитанции и через  $T_{ММИ}$  ( $t_2$ ) выполняет его отправку, после чего переходит в режим ожидания следующего кадра данных или кадра управления  $T_{о.д.}$ ;
- $t_4$ : получив кадр подтверждения, лидер переходит к передаче следующего кадра данных.

Передача данных выполняется кадрами фиксированного формата с длительностью  $T_{КД}$  (приложение А.6). Период ожидания кадра квитанции равен сумме:

$$T_{о.п.} = T_{ММИ} + T_{КУ.СПД}, \quad (2.4.2.1)$$

где  $T_{ММИ}$  – минимальный межкадровый интервал (2.4.1.2; приложение А.4);  $T_{КУ.СПД}$  – длительность кадра управления среды передачи данных (приложение А.3).

Длительность транзакции передачи данных  $T_{тр.ПД}$  определена выражением (2.4.1.7). В случае отсутствия кадра квитанции лидер определяет неудачную попытку передачи данных, инкрементирует счетчик попыток и выполняет повторную попытку передачи по окончании периода ожидания  $T_{о.п.}$ . Если счетчик неудачных попыток достиг значения  $r$ , то лидер определяет отказ среды передачи данных и завершает соединение. При выполнении успешной попытки передачи кадра данных счетчик неудачных попыток обнуляется.

После отправки кадра квитанции ведомый узел находится в режиме ожидания кадра данных  $T_{о.д.}$ . Длительность периода ожидания кадра данных зависит от:

- длительности транзакции передачи данных  $T_{тр.ПД}$ ,
- допустимого количества повторных попыток  $r$ ,
- вероятности потери кадра  $Q_{ПК}$ .

По истечении  $T_{о.д.}$ , при отсутствии приема кадров управления или данных, ведомый узел завешает соединение. Величина периода ожидания данных определяется выражением (2.4.1.7).

Для оценки надежности узла следующего перехода требуется определить величину средней задержки успешной транзакции передачи данных в условиях действия помех на входах узлов-участников соединения. Пусть блок данных объемом  $D$  передается кадрами размера  $L_{КД}$ , в течение цикла передачи данных, состоящего из  $N$  итераций передачи кадров данных. Каждая итерация представляет собой транзакцию передачи данных:

$$T_{тр.ПД} = T_{КД} + T_{ММИ} + T_{КУ.СПД} + T_{ММИ}. \quad (2.4.2.2)$$

В случае отсутствия кадра квитанции в течение  $T_{о.п.}$  передающий узел увеличит значение счетчика попыток, сравнит его значение с предельным значением  $r$  и повторит попытку передать кадр данных или завершит процедуру передачи данных. Таким образом, в состав успешной попытки передачи кадра будет входить  $l$  неудачных итераций, где  $0 \leq l \leq (r - 1)$  и одна итерация успешная.

Размеры кадров данных и управления отличаются. Следовательно, вероятности  $Q_{пкд}$ ,  $Q_{пкк}$  потери кадров данных и управления неравны. Однако, для выполнения моделирования примем:

$$Q_{пкд} = Q_{пкк} = Q_{пк}. \quad (2.4.2.3)$$

Неудачной считается попытка, при которой произошла потеря передаваемого кадра данных или потеря кадра квитанции. Тогда, среднее время выполнения успешной транзакции передачи данных определяется выражением:

$$T_{тр.пд.ср}(r) = T_{тр.пд} + \sum_{l=0}^{r-1} [(Q_{пк} + P_{упк} * Q_{пк})^l * T_{тр.пд}], \quad (2.4.2.4)$$

где  $P_{упк} = 1 - Q_{пк}$  – вероятность успешной попытки передачи кадра данных;  $Q_{пк}$  – вероятность потери кадра управления в результате действия помех в каналах среды передачи данных.

При выполнении моделирования среднего времени успешной транзакции передачи данных на выбранном канале  $e_{пд,i} \in E_{пд}$  использовались характеристики физического и канального уровней коммуникационной системы радиодоступом [14] (приложения А.4, А.6) и были приняты следующие исходные данные:

- $Q_{пк} = (0 \div 1)$  – вероятности потери кадра; шаг изменения – 0.1;
- $r = (1 \div 8)$  – количество повторных попыток передачи кадра данных; шаг изменения – 1.

В результате моделирования получены зависимости времени транзакции передачи данных передачи данных  $T_{тр.пд.ср}$  от вероятности потери кадров  $Q_{пк}$  и допустимого количества повторных попыток выполнения процедуры  $r$  (рисунок 2.4.2.2), обозначенные номерами 1 ÷ 8.

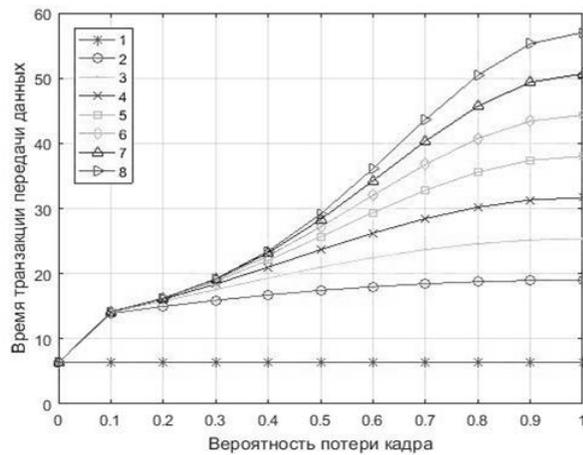


Рисунок 2.4.2.2 Среднее время транзакции передачи данных при различных значениях вероятности потери кадра  $Q_{п.к.}$  и допустимого количества повторных попыток передачи  $r$ ; 1:  $r = 1$ ; 2:  $r = 2$ ; 3:  $r = 3$ ; 4:  $r = 4$ ; 5:  $r = 5$ ; 6:  $r = 6$ ; 7:  $r = 7$ ; 8:  $r = 8$

Численные результаты математического моделирования времени транзакции передачи данных при различных значениях вероятности потери кадров  $Q_{п.к.}$  и допустимого количества повторных попыток передачи данных  $r$  приведены в таблице А.7.1 (приложение А.7).

Анализ полученных результатов показывает, что снижение качества канала  $e_{п.д.i} \in E_{п.д.}$  вызывает рост вероятности потери кадра  $Q_{п.к.}$  и соответственно времени транзакции передачи данных  $T_{тр.п.д.ср.}$ . Так при  $Q_{п.к.} = 0.1$  и  $r = 2$  время транзакции равно  $T_{тр.п.д.ср.} = 13.874с$ . При увеличении  $Q_{п.к.} = 0.9$  и  $r = 2$  время транзакции изменяется  $T_{тр.п.д.ср.} = 18.943с$ . (рисунок 2.4.2.2; таблица А.7.1).

Увеличение допустимого количества повторных попыток передачи кадров также приводит к росту времени выполнения транзакции передачи данных, что особенно проявляется с ростом вероятности потери кадра. Так при  $r = 2$  и  $Q_{п.к.} = 0.4$  время транзакции равно  $T_{тр.п.д.ср.} = 16.725с$ . При увеличении  $r = 8$  и  $Q_{п.к.} = 0.4$  время транзакции изменяется  $T_{тр.п.д.ср.} = 23.438с$  (рисунок 2.4.2.2; таблица А.7.1).

В результате выполнения моделирования процедуры передачи данных получены зависимости времени выполнения транзакции передачи данных в условиях действия помех, особенностей механизма базового доступа к среде передачи данных и при заданных параметрах алгоритма обмена данными. Полученные зависимости и численные результаты математического моделирования позволяют определить интенсивность обработки запросов передачи данных, что в свою очередь позволяет определить готовность узла к обработке запросов передачи данных.

Увеличение количества повторных попыток передачи данных повышает вероятность успешной передачи кадра данных, но приводит к значительному росту времени выполнения транзакции передачи данных, а также не решает проблему обеспечения заданного уровня

надежности обмена данными в случаях длительных периодов значительного снижения качества, принимаемого в отдельном физическом канале, сигнала. Для обеспечения заданного уровня надежности необходимо использование резервных каналов передачи данных.

Вариативность параметров физической среды, выраженная в изменениях вероятности потери кадра, приводит к необходимости принятия мер, нацеленных на повышение надежности выполнения транзакции передачи данных, что должно быть учтено при разработке структуры линии передачи данных.

В результате идентификации параметров взаимодействия узлов в среде передачи данных определены основные параметры алгоритма обмена данными: длительность передачи кадров данных и управления, время транзакции передачи кадра данных. Максимальное время передачи данных при заданном размере передаваемого блока данных определяется количеством допустимых попыток подготовки передачи данных и количеством допустимых попыток выполнения транзакций передачи данных. Установлено, что среда передачи данных является восстанавливаемой системой.

## **2.5. Идентификация параметров взаимодействия узлов в ходе установления и поддержки отношений соседства**

Устанавливая и поддерживая отношения соседства узлы выполняют сбор, обработку статистических данных качества физических каналов, обеспечивающих обмен данными соседних узлов. Сбор статистических данных основан на приеме кадров управления, передаваемых узлами в заданных каналах среды установления соединения  $E_{УС}$ . В результате каждый узел формирует для каждого отношения соседства и каждого физического канала дискретную последовательность полученных оценок качества. Обмен данными о качестве физических каналов между соседними узлами позволяет сформировать линии передачи данных и получить оценку их надежности.

Поиск смежных узлов, установление с ними отношений соседства и последующая поддержка установленных отношений выполняется каждым узлом в течении всего времени функционирования. Наличие отношений соседства между узлами позволит обеспечить выполнение следующих операций:

- осуществлять оценку качества принимаемых от соседних узлов сигналов в заданных физических каналах  $e_{УС,i} \in E_{УС}$  и  $e_{ПД,i} \in E_{ПД}$ ;
- выполнять оценку надежности каналов на основе статистической обработки, собранных данных;

- формировать между соседними узлами линии передачи данных, обеспечивающие заданный уровень качества информационного обмена;
- осуществлять распространение маршрутной информации; формировать маршруты доставки сообщений удаленным узлам [49].

Для установления и поддержки отношений соседства необходимо, чтобы каждый узел с заданной периодичностью в среде установления соединения рассылал служебные кадры объявления (Hello). Тогда, после приема кадра с неизвестным ранее адресом источника, текущий узел инициирует процедуру установления отношений соседства. Для этого рассылка кадров объявления выполняется в широковещательном режиме адресации (приложение А.8). Получая кадры Hello и другие кадры управления, узлы выполняют оценку качества сигнала, принимаемого заданным соседним узлом в текущем физическом канале  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ . Тогда, период рассылки объявлений Hello [102] определяется исходя из особенностей организации среды установления соединения (раздел 2.1) и принятого метода доступа к среде (раздел 2.3):

$$T_{Hello} = T_K * K_{ч.к.}, \quad (2.5.1)$$

где  $T_K$  определяется выражениями (2.3.2);  $K_{ч.к.}$  – коэффициент чередования каналов при рассылке кадров объявлений (является простым числом для устранения кратности). Передача объявления Hello с интервалом  $T_{Hello}$  обеспечивает поддержку отношений соседства.

В ходе взаимодействия в среде установления соединения соседние узлы для каждого отношения соседства выполняют периодическую оценку всех каналов  $\{e_{УС.i}\} \in E_{УС}$ . Период повторного измерения канала равен:

$$T_{Пик} = T_{Hello} * N_{к.УС}, \quad (2.5.2)$$

где  $N_{к.УС} = |E_{УС}|$  – количество каналов среды установления соединения.

Для поддержки отношений соседства узлы, в соответствии с принятыми алгоритмами (разделы 2.3, 2.4), необходимо выполнить обмен данными о качестве физических каналов с периодом обновления отношений соседства  $T_{ООС}$ . Задача оценки качества каналов решается в разделе 3.3.

Взаимодействие соседних узлов в среде установления соединения направлено на поддержание отношений соседства. В контексте данной задачи узлы продолжают рассылать кадры объявлений Hello с периодом  $T_{Hello}$  и собирают статистические данные о качестве сигналов, принимаемых от соседних узлов в различных каналах. Для поддержки отношений соседства узлы, в соответствии с принятыми алгоритмами (разделы 2.3, 2.4), выполняют обмен накопленными данными о качестве физических каналов  $\{e_{УС.i}\} \in E_{УС}$  и  $\{e_{ПД.i}\} \in E_{ПД}$  с периодом обновления отношений соседства  $T_{ООС}$ .

Величина период  $T_{00c}$  зависит от особенностей физической среды. По результатам исследований [2; 8] распределение длительностей уровней помех и интервалов между ними на среднем уровне ( $\overline{T_{\Pi}} = \overline{\theta_{\text{инт}}}$ ) близко к нормальному с параметрами:  $\overline{T_{\Pi.0.5}} = \overline{\theta_{\text{инт.0.5}}} = 15.5$  минут и  $\sigma_{\overline{T_{\Pi}} = \overline{\theta_{\text{инт}}}} = 4.5$  минут. Основываясь на статистических данных [2; 8], примем, что среднее значение периода квазистационарности физического канала равно:

$$T_{\text{КСК}} = \overline{T_{\Pi}} = \overline{\theta_{\text{инт}}} = 15.5 \text{ мин} = 930 \text{ с.}, \quad (2.5.3)$$

где  $\overline{T_{\Pi}}$  – средняя длительность периода отказа канала;  $\overline{\theta_{\text{инт}}}$  – средняя длительность интервала между отказами канала [8].

Для оценки состояния канала требуется выполнять измерение изменяющегося процесса с частотой не менее чем в два раза превышающей частоту изменений. Тогда, величина периода оценки канала определяется отношением:

$$T_{\text{ОК}} \leq \frac{T_{\text{КСК}}}{2}. \quad (2.5.4)$$

Следовательно, период повторного измерения канала не должен превышать значения периода оценки канала:

$$T_{\text{Пик}} \leq T_{\text{ОК}}. \quad (2.5.5)$$

В результате действия помех рассылаемые объявления Hello могут быть не приняты некоторыми узлами. В этом случае узел соседний узел не получает обновления оценки качества физического канала и подтверждения присутствия соседнего узла в составе системы. При этом, соседний узел должен продолжать поддержку отношений соседства и сохраняет предыдущую оценку качества физического канала в течении интервала достоверности оценки  $T_{\text{ДОК}}$ . При этом выполняется условие:

$$T_{\text{Пик}} \leq T_{\text{ДОК}} \leq T_{\text{ОК}}. \quad (2.5.6)$$

Следовательно, период обновления отношений соседства должен удовлетворять неравенству:

$$T_{00c} \leq T_{\text{ДОК}}. \quad (2.5.7)$$

Численные значения периодов взаимодействия узлов в среде установления соединения приведены в приложении А.8.

Таким образом, для установления и поддержания отношений соседства определены зависимости периодов рассылки объявлений узлов и обновления отношений. Отношения соседства обеспечивают выполнение следующих функций необходимых для реализации имитационной модели коммуникационной системы:

- периодическая оценка качества сигналов, принимаемых от соседних узлов в заданных каналах;

- формирование прогнозируемой на следующий период обновления отношений соседства оценки надежности физических каналов при приеме кадров от заданного соседнего узла;
- адаптация линии передачи данных к изменяющимся условиям физической среды.

Период определения качества, принимаемого от заданного соседнего узла сигнала, не превышает периода квазистационарности заданного физического канала, что должно позволить обнаруживать существенные (длительные) изменения качества физической среды. Каждый узел исследуемой коммуникационной системы с периодом  $T_{Hello}$  рассылает кадры уведомления в канала установления соединения  $\{e_{yc,i}\} \in E_{yc}$ . Период обновления отношений соседства должен обеспечивать возможность обмена актуальными данными качества физической между соседними узлами.

В результате идентификации параметров взаимодействия узлов в ходе установления и поддержки отношений соседства установлены отношения периодов: квазистационарности канала, рассылки объявлений узла, повторного измерения качества канала, достоверности оценки качества канала, обновления отношений соседства.

## 2.6. Выводы по главе 2

1. В результате анализа процесса обмена данными при непосредственном взаимодействии узлов получено, что: процесс обмена данными между соседними узлами 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. Среда установления соединения обеспечивает установление отношений соседства, командное взаимодействие соседних узлов и сбор статистических данных качества принимаемых сигналов. Доступ к среде установления соединения синхронный конкурентный. Среда передачи данных обеспечивает передачу полезных данных с наилучшим качеством для каждой пары соседних узлов. Доступ к среде передачи данных асинхронный «точка-точка».
2. Синтезирована структура узла исследуемой коммуникационной системы. Получена взаимосвязь элементов обеспечивающих формирование линий передачи данных, составляющих маршрут доставки сообщений.
3. В результате идентификации параметров взаимодействия узлов в среде установления соединения определены основные параметры алгоритма обмена данными: время активности канала, длительность слота канала, количество слотов, длительность передачи кадра. Определена зависимость длительности транзакции установления соединения от

параметров принятого алгоритма обмена данными и качества среды установления соединения. Минимальное время установления соединения составило 1.6с. Максимальная длительность процедуры установления соединения определяется качеством среды и количеством допустимых попыток. Определены предельные значения интенсивностей доступа к среде при различном количестве конкурирующих узлов и заданных вероятностях повторных попыток передачи данных задолженными узлами. Установлено, что среда установления соединения является восстанавливаемой системой. Определена длительность восстановления среды установления соединения.

4. В результате идентификации параметров взаимодействия узлов в среде передачи данных определены основные параметры алгоритма обмена данными: длительность передачи кадров данных и управления, время транзакции передачи кадра данных. Максимальное время передачи данных при заданном размере передаваемого блока данных определяется количеством допустимых попыток подготовки передачи данных и количеством допустимых попыток выполнения транзакций передачи данных. Установлено, что среда передачи данных является восстанавливаемой системой.
5. В результате идентификации параметров взаимодействия узлов в ходе установления и поддержки отношений соседства установлены отношения периодов: квазистационарности канала, рассылки объявлений узла, повторного измерения качества канала, достоверности оценки качества канала, обновления отношений соседства.

### ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

#### 3.1. Структурно-параметрический синтез маршрута доставки сообщений в пространстве параметров надежности

Для доставки сообщений удаленному узлу узел-источник формирует маршрут передачи данных до узла назначения. В условиях нестационарности физической среды оптимальность формируемых маршрутов должна оцениваться по критерию их надежности. Маршрут передачи данных состоит из элементов коммуникационной системы, образующих подсистему передачи данных. Надежность системы передачи данных определяется непрерывностью её работы. Для оценки непрерывности работы системы используется коэффициент готовности, как функция расстояния от источника до назначения т.е. метрика маршрута.

Для формирования зависимости коэффициента готовности маршрута передачи данных применен метод анализа надежности технических систем на основе теории марковских процессов [18]. Метод предполагает использование системы дифференциальных уравнений в частных производных, полученной на основе заданного алгоритма функционирования системы. Формирование маршрутов передачи данных и определение показателей их надежности выполняется с заданным периодом обновления отношений соседства (раздел 2.5).

Взаимодействие узлов в ходе выполнения обмена данными формирует топологию исследуемой коммуникационной системы, которая представлена следующими параметрами:

- $G = (N, L)$  – граф топологии коммуникационной системы;
- $N = \{n_i, i = \overline{1, n}\}$  – множество узлов коммуникационной системы,  $s, k, d = \overline{1, n}$  – узлы источника, следующего перехода и назначения соответственно;
- $L = \{l_{ij} = (i, j); i, j = \overline{1, n}; i \neq j\}$  – множество линий передачи данных, где  $l_{sk} = (s, k)$  представляет линию передачи данных, соединяющую соседние узлы  $s, k$ .

Особенности физической среды исследуемой коммуникационной системы создают сложности при выполнении обмена данными, а в некоторых случаях приводят к отказу непосредственного взаимодействия узлов. Следовательно, множество узлов  $N$  коммуникационной системы разделяется на подмножества:

- соседних узлов  $M_i = \{n_i\} \in N$ , где  $|M_i| \leq |N|$ , поддерживающих непосредственный обмен данными;
- удаленных узлов  $n_i \in M_i$  и  $n_j \in M_j$ , где  $i \neq j$ , поддерживающих обмен данными через промежуточные узлы средствами маршрутизации.

Протокол маршрутизации, действующий в условиях исследуемой коммуникационной системы должен:

- учитывать нестационарность каналов, масштабируемость системы и динамичность многосвязной топологии;
- содержать в своем составе средства сбора и обработки статистических данных качества принимаемых сигналов и управления потоками данных;
- обнаруживать соседние узлы, устанавливать и поддерживать с ними отношения соседства;
- для каждого отношения соседства формировать и поддерживать линии передачи данных, используя методы повышения надежности передачи данных;
- определять топологию коммуникационной системы, используя диффузный алгоритм распространения маршрутной информации;
- формировать оптимальные маршруты доставки сообщений на основе оценки их надежности.

Пусть исследуемая коммуникационная система имеет топологию, представленную графом на рисунке 3.1.1, в состав которой входят смежные  $\{s, k, j, i\} \in M_s$  и удаленные  $\{s, d\}$  узлы, где  $d \in M_d$ , а расстояние между узлами  $p(s, i) = 1$  и  $p(s, d) > 1$ . Тогда, для доставки сообщений от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$  необходимо определить маршруты передачи данных.

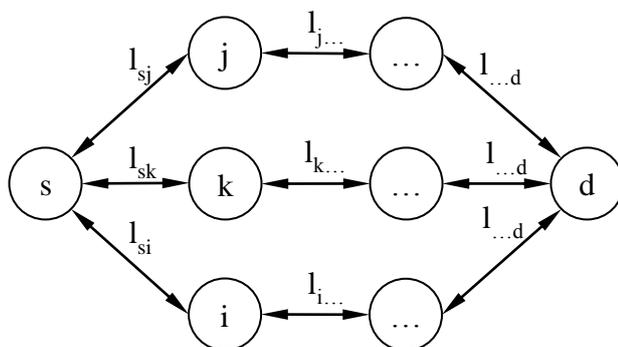


Рисунок 3.1.1 Граф топологии исследуемой коммуникационной системы

Доставка сообщений от узла  $s$  до узла  $d$  выполняется по маршруту, представляющему конечную последовательность ребер  $\{l_{sk}, l_{k...}, \dots, l_{...d}\}$  соединенных инцидентными вершинами  $\{s, k, \dots, d\}$ , показанную на рисунке 3.1.2.

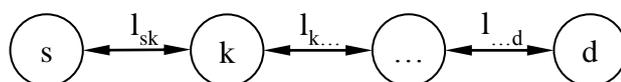


Рисунок 3.1.2 Конечная последовательность ребер  $(l_{s,k}, l_{k,\dots}, \dots, l_{\dots,d})$ , составляющих маршрут доставки сообщений от узла  $s$  до узла  $d$

При условии использования диффузного метода распространения маршрутной информации [39, 66] любой маршрут от узла источника до узла назначения есть система (рисунок 3.1.3), элементами которой являются:

$$R_{sd} = \{l_{sk} \cup R_{kd}\}, \quad (3.1.1)$$

где  $l_{sk}$  – линия передачи данных от узла источника  $s$  до узла следующего перехода  $k$ ; маршрут  $R_{kd}$  – сообщенный узлом  $k$  маршрут от узла следующего перехода  $k$  до узла назначения  $d$ , где  $R_{kd}$  представляет конечную последовательность ребер  $\{l_{k\dots}, \dots, l_{\dots d}\}$ , соединенных инцидентными вершинами  $\{k, \dots, d\}$  [103, 104, 105].



Рисунок 3.1.3 Маршрут от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$  при диффузном распространении маршрутной информации

Для доставки сообщений от узла  $s$  до узла  $d$  пакеты данных передаются узлом  $s$  на выбранный узел следующего перехода  $k$  через линию передачи данных  $l_{sk}$ . Далее узел  $k$  самостоятельно принимает решение о выборе маршрута для передачи данных конечному узлу  $d$ .

Линия передачи данных  $l_{sk}$ , представляющие собой совокупность технических средств, физической среды и алгоритмов функционирования для обеспечения непосредственного обмена данными соседних узлов ( $s, k$ ) [104, 106]. Тогда, для построения модели формирования маршрута передачи данных по критерию надежности примем, что любой маршрут от узла источника до узла назначения может быть представлен в виде нерезервированной восстанавливаемой системы с основным соединением элементов [105]. Схема модели маршрута  $R_{sd}$  представлена на рисунке 3.1.4.

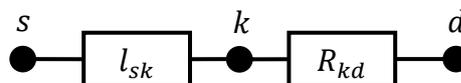


Рисунок 3.1.4 Схема модели маршрута доставки сообщений от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$ ;  $l_{sk}$  – линия передачи данных узлов ( $s, k$ );  $R_{kd}$  – маршрут от узла следующего перехода  $k$  до узла назначения  $d$

Каждый элемент  $\{l_{sk}, R_{kd}\}$  маршрута  $R_{sd}$  с течением времени изменяет свое состояние на «восстановление» в случае отказа и «исправен» после восстановления. Отказ любого элемента приводит к отказу маршрута  $R_{sd}$ . При отказе линии передачи данных  $l_{sk}$  сообщенный маршрут  $R_{kd}$  остается в рабочем состоянии, но не используется узлом  $s$  для передачи сообщений. Аналогично, в случае отказа сообщенного маршрута  $R_{kd}$  происходит отказ маршрута  $R_{sd}$ , при этом  $l_{sk}$  переходит в режим ожидания восстановления маршрута  $R_{kd}$ .

Состояние линии  $l_{sk}$  зависит от качества физических каналов и особенностей реализации алгоритмов передачи данных. Состояние сообщенного маршрута  $R_{kd}$  зависит от состояния линий передачи данных, входящих в его состав.

Принимая во внимание особенности физической среды исследуемой коммуникационной системы [2, 3, 4, 5, 8, 9, 11] и то, что непрерывность передачи является одним из основных показателей качества [2], оценка надежности маршрута передачи данных выполняется по величине коэффициента его готовности [17, 104, 105]. На рисунке 3.1.5 показан граф состояний вероятного маршрута доставки сообщений.

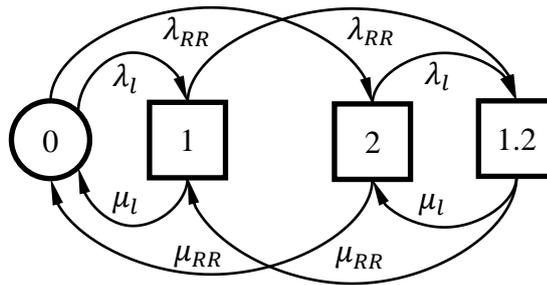


Рисунок 3.1.5 Граф состояний маршрута доставки сообщений;  $\{0, 1, 2, 1.2\}$  – состояния системы – маршрут  $R_{sd}$ ;  $\lambda_l, \mu_l$  – интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных  $l_{sk}$ ;  $\lambda_{RR}, \mu_{RR}$  – интенсивности отказов и восстановлений сообщенного маршрута  $R_{kd}$

Состояние системы – маршрут  $R_{sd}$  показано вершинами графа:

- 0: маршрут  $R_{sd}$  находится в исправном состоянии;
- 1: линия  $l_{sk}$  восстанавливается после отказа; сообщенный маршрут  $R_{kd}$  находится в исправном состоянии; маршрут  $R_{sd}$  – неисправен;
- 2: сообщенный маршрут  $R_{kd}$  восстанавливается после отказа; линия  $l_{sk}$  находится в исправном состоянии; маршрут  $R_{sd}$  – неисправен;
- 1.2: линия  $l_{sk}$  восстанавливается после отказа; сообщенный маршрут  $R_{kd}$  восстанавливается после отказа; маршрут  $R_{sd}$  – неисправен.

В установившемся режиме отказы и восстановления системы представляют собой стационарный поток событий с интенсивностями отказов  $\lambda_l, \lambda_{RR}$  и восстановлений  $\mu_l, \mu_{RR}$  линии передачи данных  $l_{sk}$  и сообщенного маршрута  $R_{kd}$  соответственно. Длительности периодов безотказной работы и восстановлений элементов маршрута  $R_{sd}$  являются случайными величинами и распределены по экспоненциальному закону со средними  $\{\lambda_l, \mu_l, \lambda_{RR}, \mu_{RR}\}$ . Следовательно, процесс изменения состояния системы – маршрут является однородным Марковским процессом с дискретным множеством состояний. Функционирование системы – маршрут [105] в соответствии с графом (рисунок 3.1.5) представлено системой дифференциальных уравнений Чэпмана-Колмогорова:

$$\begin{cases} p_0'(t) = -(\lambda_l + \lambda_{RR})p_0(t) + \mu_l p_1(t) + \mu_{RR} p_2(t) \\ p_1'(t) = \lambda_l p_0(t) - (\mu_l + \lambda_{RR})p_1(t) + \mu_{RR} p_{1.2}(t) \\ p_2'(t) = \lambda_{RR} p_0(t) - (\mu_{RR} + \lambda_l)p_2(t) + \mu_l p_{1.2}(t) \\ p_{1.2}'(t) = \lambda_{RR} p_1(t) + \lambda_l p_2(t) - (\mu_l + \mu_{RR})p_{1.2}(t) \end{cases} \quad (3.1.2)$$

Для любого момента времени  $t$ :

$$p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_{1.2}(t) = 1. \quad (3.1.3)$$

Решение системы уравнений (3.1.2) выполняем при начальных условиях:

$$p_0(0) = 1; p_1(0) = p_2(0) = p_{1.2}(0) = 0. \quad (3.1.4)$$

В результате решения системы уравнений 3.1.2 получено выражение стационарной вероятности нахождения системы в исправном состоянии для стационарного состояния системы (при  $t \rightarrow \infty$ ):

$$p_0 = \frac{\mu_l \mu_{RR}}{(\lambda_l + \mu_l) * (\lambda_{RR} + \mu_{RR})}. \quad (3.1.5)$$

Стационарная вероятность исправного состояния маршрута есть коэффициент его готовности  $F_R \equiv p_0$ . В источниках [18, 107] получено выражение для коэффициента готовности одного элемента в стационарном состоянии:

$$F = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (3.1.6)$$

Нахождение системы – маршрут в исправном состоянии есть совместная вероятность двух независимых событий. Тогда, преобразуя (3.1.5) и используя (3.1.6), получено следующее выражение коэффициента готовности маршрута:

$$F_R = \frac{\mu_l \mu_{RR}}{(\lambda_l + \mu_l) * (\lambda_{RR} + \mu_{RR})} = F_l * F_{RR}, \quad (3.1.7)$$

где  $F_l$  – коэффициент готовности линии передачи данных  $l_{sk}$ ;  $F_{RR}$  – коэффициент готовности сообщенного маршрута  $R_{kd}$ . Соседние узлы сообщают текущему узлу метрику проходящих через них маршрута передачи данных удаленным узлам, в виде коэффициентов готовности  $F_{RR}$ , который является агрегированной оценкой надежности всех линий передачи данных от узла следующего перехода до узла назначения. Полученный коэффициент готовности  $F_R$  определяет надежность вероятного маршрута передачи данных  $R_{sd}$ , как единой системы.

Выбор узла следующего перехода для передачи данных удаленному узлу выполняется на основе построенной каждым узлом таблицы маршрутов. Каждый узел потенциально поддерживает  $K$  линий передачи данных с соседними узлами. В соответствии с протоколом установления и поддержки отношений соседства (раздел 2.5) каждый узел  $s$  для каждой линии передачи данных  $l_{sk}$  в течение заданного периода обновления отношений соседства ( $T_{00c.sk}$ ) выполняет сбор статистических данных качества сигналов, принимаемых от соседнего узла  $k$  в заданных каналах  $e_{yc.i} \in E_{yc}$ . На основе полученных статистических данных для каждой линии передачи данных определяются:

- интенсивности отказов  $\lambda_{l.sk}$  и восстановлений  $\mu_{l.sk}$ ;
- коэффициент готовности линии передачи данных  $F_{l.sk}$ .

В результате обмена данными с соседними узлами узел  $s$  определяет в направлении узла  $d$  вероятные маршруты доставки сообщений через смежные узлы  $j, k, i$ , являющиеся вероятными узлами следующего перехода. С каждым из указанных узлов, узел  $s$  устанавливает отношения соседства, формирует и поддерживает линии передачи данных  $l_{sj}, l_{sk}, l_{si}$ . Для каждой линии выполняется оценка надежности  $F_{l.sj}, F_{l.si}, F_{l.sk}$ . На рисунке 3.1.4 показан граф маршрутов доставки сообщений от текущего узла  $s$  до удаленного узла назначения  $d$ .

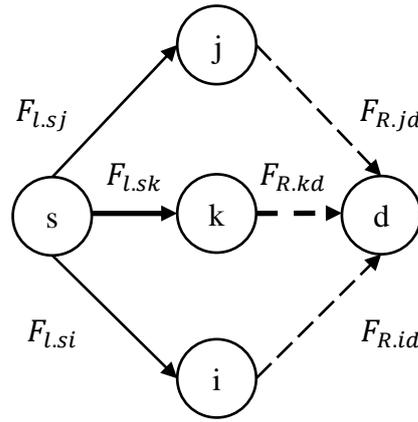


Рисунок 3.1.6 Граф вероятных маршрутов доставки сообщений от текущего узла  $s$  до удаленного узла назначения  $d$

Значения метрики маршрутов передачи данных до узла назначения  $d$  ( $F_{R.jd}, F_{R.kd}, F_{R.id}$ ) сообщаются узлу  $s$  вероятными узлами следующего перехода ( $j, k, i$ ) в ходе поддержки отношений соседства. В результате работы диффузного алгоритма распространения маршрутной информации и с учетом особенностей многосвязной топологии каждый узел получает не более  $K$  вероятных маршрутов доставки сообщений до заданного узла назначения. В этом случае текущим маршрутом передачи данных удаленному узлу назначается вероятный маршрут, имеющий наибольший коэффициент готовности:

$$F_{R.sd} = \frac{\mu_{l.sk}}{\lambda_{l.sk} + \mu_{l.sk}} * F_{R.kd} = F_{l.sk} * F_{R.kd} \rightarrow \max. \quad (3.1.8)$$

Максимизация коэффициента готовности маршрута доставки сообщений выполняется при использовании методов повышения надежности при формировании линий передачи данных, а также распространении соседними узлами наиболее надежных маршрутов доставки сообщений. Ограничением максимизации коэффициента готовности является время выполнения передачи данных соседнему узлу  $T_{l.sk}$ . Тогда, целевая функция приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} F_{R.sd} = \frac{\mu_{l.sk}}{\lambda_{l.sk} + \mu_{l.sk}} * F_{R.kd} = F_{l.sk} * F_{R.kd} \rightarrow \max \\ T_{l.sk} \rightarrow \min \end{cases}. \quad (3.1.9)$$

Таким образом, доставка сообщений удаленным узлам выполняется через промежуточные узлы коммуникационной системы по определенным маршрутам, оптимальность которых определяется показателем надежности. Маршрут передачи данных есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов:

- линии передачи данных, соединяющей узел-источника с узлом следующего перехода;
- маршрута от узла следующего перехода до узла назначения.

В результате структурно-параметрического синтеза получено, что маршрут доставки сообщений есть восстанавливаемая система, обеспечивающая доставку сообщений конечному абоненту. В результате структурного синтеза и на основе анализ алгоритма диффузного распространения топологической информации идентифицированы элементы маршрута доставки сообщений: линия передачи данных, соединяющая узел источника с узлом следующего перехода, и маршрут передачи данных до узла назначения, сообщенный узлом следующего перехода. Идентифицированы параметры маршрута доставки сообщений: интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных и коэффициент готовности сообщенного маршрута. В результате параметрического синтеза получен критерий оценки надежности маршрута. Получена целевая функция для формирования оптимального по критерию надежности маршрута доставки сообщений. Коэффициент готовности определен в качестве критерия оценки надежности маршрута.

### 3.2. Идентификация параметров надежности линии передачи данных

Маршрут  $R_{sd}$  от узла источника до узла назначения есть конечная последовательность линий передачи данных  $l_{ij} \in L$ . Следовательно, для формирования метрики маршрута по критерию его надежности определить структуру линии передачи данных, алгоритмы работы её элементов и разработать метод оценки её надежности. Основу формируемых линий передачи данных составляют нестационарные физические каналы. Следовательно, в составе линий передачи данных должны быть реализованы функции нацеленные на повышение надежности обмена данными:

- сбор и обработка статистических данных качества принимаемых сигналов в заданных физических каналах;
- использование множества физических каналов и механизмов их замены;
- адаптация линий передачи данных к изменяющимся условиям;
- управление потоками данных;
- обеспечение передачи данных в линии с надежностью, превышающей надежность отдельных физических каналов.

Линии передачи данных создаются в результате установления и поддержания отношений соседства узлов. Для каждой пары соседних узлов определяется период обновления отношений соседства  $T_{00c}$  (раздел 2.5), в течение которого соседние узлы выполняют сбор и обработку статистических данных качества принимаемых от соседнего узла сигналов в различных каналах  $e_{yc.i} \in E_{yc}$ .

Основываясь на результатах исследований (разделы 2.1, 2.3, 2.4), процесс передачи данных между соседними узлами разделяется на основных три этапа:

- установление соединения;
- запрос готовности узла следующего перехода;
- передача данных.

Этапы процесса передачи данных выполняются последовательно. Выполнение каждого этапа обеспечивается наличием материальной, функциональной и алгоритмической составляющих, формирующих элементы системы – линия передачи данных.

Процесс установления соединения выполняется в соответствии с моделью и правилами доступа к среде передачи данных (раздел 2.3). Синхронный конкурентный доступ к активному в момент времени  $t$  физическому каналу  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  позволяет сформировать между всеми узлами  $M_i \in M$  единую среду доступа. Для каждого отношения соседства в каждом физическом канале  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  формируется среда установления соединения [104, 105], которая используется узлами для передачи управляющих кадров и определения качества сигналов, принимаемых от соседних узлов. Обмен кадрами управления в среде установления соединения выполняется в соответствии с моделью процесса обмена данными на этапе установления соединения (раздел 2.3).

Для увеличения вероятности установления соединения узлы выполняют повторные попытки передачи кадров в каналах  $e_{yc.j} \in E_{yc}$  отличных от канала, вызвавшего отказ. Тогда,  $g$  каналов  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  формируют между соседними узлами трассу установления соединения, где  $g$  – допустимое количество повторных попыток.

В ходе установления соединения узел-источник выполняется запрос готовности узла следующего перехода [104, 105]. Через каждый узел коммуникационной системы проходят потоки данных, создаваемых различными узлами источниками. В соответствии с предложенной схемой (раздел 2.2) положим, что узел следующего перехода представляет собой одноканальную СМО типа М/М/1. Тогда, при поступлении запроса узел следующего перехода переходит в занятое состояние, начинает обмен данными и отвечает отказом на все последующие запросы до завершения текущей процедуры обмена. Длительность обработки

запроса определяется размером передаваемого блок данных, принятым протоколом обмена данными и надежностью среды передачи данных (2.4.2.4).

Передача полезных данных выполняется в среде передачи данных в соответствии с моделью процесса передачи данных (раздел 2.4). На основе оценки качества каналов  $\{e_{yc.i}\} \in E_{yc}$  для каждого отношения соседства формируется множество каналов передачи данных  $e_{pd.i} \in E_{pd}$ , соответствующие заданным требованиям качества. Для увеличения надежности передачи данных выбранные каналы  $\{e_{pd.i}\} \in E_{pd}$  объединяются в структуру – интерфейс [104, 105]. Взаимодействие соседних узлов при обмене полезными данными выполняется средствами интерфейсов, при этом между интерфейсами формируется трасса передачи данных.

Исходя из вышесказанного, линия передачи данных представляет собой восстанавливаемую систему с основным соединением элементов [104], схема которой показана на рисунке 3.2.1.

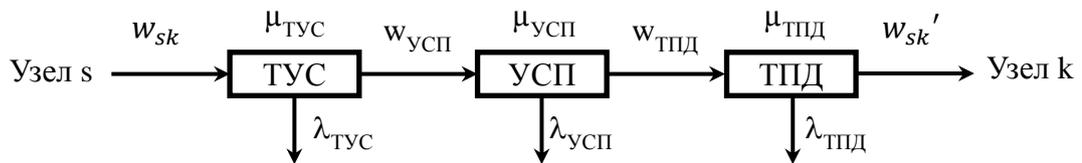


Рисунок 3.2.1 Базовая структура линии передачи данных: ТУС – трасса установления соединения; УСП – узел следующего перехода; ТПД – трасса передачи данных;  $w$  – интенсивность потока;  $\lambda$  – интенсивность отказов;  $\mu$  – интенсивность восстановления

На вход линии передачи данных  $l_{sk}$  поступает поток запросов передачи данных с интенсивностью  $w_{l.sk}$ . Согласно [20, 23], интенсивность суммарного потока в линии  $l_{sk}$ , проходящего по все путям, определяется выражением:

$$w_{sk} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{w_{ij}}{w}, \quad (3.2.1)$$

где  $n = |N|$  – количество узлов в коммуникационной системе;  $w$  – полный внешний трафик, поступающий в коммуникационную систему. Увеличение интенсивности потока  $w_{sk}$ , приводит к росту интенсивности отказов в подмножестве соседних узлов  $M_i \in M$  и увеличению задержки процедуры установления соединения  $T_{зус}$  (2.3.16). Каждый из элементов линии передачи данных {ТУС, УСП и ТПД} характеризуется интенсивностями отказов и восстановлений  $\{\lambda_{тус}, \lambda_{усп}, \lambda_{тпд}\}$  и  $\{\mu_{тус}, \mu_{усп}, \mu_{тпд}\}$  соответственно. Тогда, часть запросов передачи данных, прошедших трассу установления соединения поступают на вход узла следующего перехода с интенсивностью  $w_{усп}$ , запросы передачи данных, принятые узлом следующего перехода, с интенсивностью  $w_{тпд}$  поступают на вход трассы передачи данных. С учетом потерь интенсивность трафика на выходе  $l_{sk}$  составит  $w'_{sk}$ .

Надежности линии передачи данных определяется на основе статистических данных качества сигналов в каналах  $E_{yc}$ . Обновление показателей надежности линии выполняется с периодом обновления отношений соседства  $T_{00c}$ . Тогда, на интервале  $T_{00c}$  интенсивность отказов линии передачи данных остается постоянной.

Интенсивности отказов  $\lambda_{Tyc}$  и восстановлений  $\mu_{Tyc}$  трассы установления соединения зависят от интенсивности потока данных  $w_{sk}$ , качества физической среды, определяемого вероятностью надежного приема дискретного сообщения  $P_{нпдс}$  [8] и от количества  $r$  используемых резервных каналов:

$$\lambda_{Tyc}(t) = f_{Tyc}(w_{sk}(t), P_{нпдс}(t), r); \mu_{Tyc}(t) = f_{Tyc.в}(w_{sk}(t), P_{нпдс}(t), r), \quad (3.2.2)$$

где  $f_{Tyc}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа;  $f_{Tyc.в}$  – плотность распределения времени до восстановления, где время до возникновения отказа и восстановления трассы установления соединения распределено по показательному закону.

Увеличение интенсивности запросов передачи данных  $w_{усп}$  и/или размера передаваемых сообщений приводит к увеличению отказов узла следующего перехода (разделы 2.3, 2.4):

$$\lambda_{усп}(t) = f_{усп}(w_{усп}(t), T_{пд}); \mu_{усп}(t) = f_{усп.в}(w_{усп}(t), T_{пд}) \quad (3.2.3)$$

где  $f_{усп}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа;  $f_{усп.в}$  – плотность распределения времени до восстановления, где время до поступления запросов и восстановлений узла следующего перехода распределено по показательному закону;  $T_{пд}$  – среднее время передачи блока данных. Интенсивность восстановления узла следующего перехода  $\mu_{усп}$  определяется временем, необходимым для передачи блока данных размером  $S$  в соответствии с принятым алгоритмом обмена данными (раздел 2.4).

Интенсивности отказов  $\lambda_{тпд}$  и восстановлений  $\mu_{тпд}$  трассы передачи данных определяются зависимостями:

$$\lambda_{тпд}(t) = f_{тпд}(P_{нпдс}(t), S, r); \mu_{тпд}(t) = f_{тпд.в}(P_{нпдс}(t), S, r), \quad (3.2.4)$$

где  $f_{тпд}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа;  $f_{тпд.в}$  – плотность распределения времени до восстановления, где время до возникновения отказов и восстановлений трассы передачи данных распределено по показательному закону;  $P_{нпдс}$  – вероятность надежного приема дискретного сообщения;  $S$  – средний размер передаваемого блока данных;  $r$  – количество резервных каналов в составе интерфейсов.

Исходя из вышесказанного, надежность линии передачи данных  $l_{sk}$  как восстанавливаемой системы с основным соединением элементов определяется следующей зависимостью:

$$F_{l.sk} = f_l(\lambda_{Tyc}(t), \mu_{Tyc}(t), \lambda_{усп}(t), \mu_{усп}(t), \lambda_{тпд}(t), \mu_{тпд}(t)), \quad (3.2.5)$$

где  $f_l$  – функция определения коэффициента готовности линии передачи данных.

Максимизация коэффициента готовности линии передачи данных  $F_{\text{ЛПД}}$  достигается за счет оптимизации параметров: трассы установления соединения, узла следующего перехода, трассы передачи данных. Исходя из полученных результатов моделирования (разделы 2.3 – 2.4), функция времени передачи блока данных через линию передачи данных имеет следующую функциональную зависимость:

$$T_{l.sk}(T_{\text{ТУС}}(w_{sk}(t), P_{\text{НПДС}}(t), r), T_{\text{УСП}}(w_{\text{УСП}}(t), T_{\text{ПД}}), T_{\text{ТПД}}(P_{\text{НПДС}}(t), S, r)). \quad (3.2.6)$$

Маршрут передачи данных от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$  формируется агрегированием конечной последовательность линий передачи данных  $\{l_{sk}, l_{k\dots}, \dots, l_{\dots d}\}$ , соединенных инцидентными вершинами  $\{s, k, \dots, d\}$ . Тогда, время передачи данных узлу назначения  $d$  определяется зависимостью:

$$T_{R.sd}(\sum_{i=1}^n T_{l.i}). \quad (3.2.7)$$

Тогда, целевая функция оптимизации показателей надежности маршрута передачи данных от источника  $s$  до назначения  $d$  через узел следующего перехода  $k$  имеет следующий вид:

$$F_{R.sd} \left( F_{l.sk} \left( F_{\text{ТУС}}(\lambda_{\text{ТУС}}, \mu_{\text{ТУС}}); F_{\text{УСП}}(\lambda_{\text{УСП}}, \mu_{\text{УСП}}); F_{\text{ТПД}}(\lambda_{\text{ТПД}}, \mu_{\text{ТПД}}) \right); F_{R.kd} \right) \rightarrow \max, \quad (3.2.8)$$

где  $T_{R.sd}(\sum_{i=1}^n T_{l.i}) \rightarrow \min$ .

Маршрут передачи данных формируется по коэффициенту готовности при оптимизации параметров элементов линии передачи данных. Результатом оптимизации является максимизация надежности маршрута передачи данных при ограниченном времени на передачу данных в линии и маршруте в целом.

Таким образом, разработана базовая структура линии передачи данных, отвечающая требованиям формирования по критерию надежности, где линия передачи данных есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов:

- трассы установления соединения,
- узла следующего перехода,
- трассы передачи данных.

Каждый элемент в свою очередь является подсистемой, надежность которой характеризуется интенсивностями отказов и восстановлений и зависит от состояния физической среды. Оптимизация параметров функции оценки надежности линии передачи данных нацелена на максимизацию коэффициента её готовности, что в свою очередь позволяет сформировать (определить) оптимальные маршруты 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.

### 3.3. Метод оценки надежности канала связи

Трассы установления соединения и передачи данных являются элементами линий передачи данных (раздел 3.2). Основу трасс установления соединения и передачи данных составляют физические каналы, отличающиеся нестационарностью уровней сигналов и помех во времени. Следовательно, в целях максимизации показателей надежности линии передачи данных необходимо выполнять анализ текущего состояния используемых физических каналов, определять оценку их надежности и осуществлять выбор наиболее надежных.

Оценка качества физического канала выполняется на основе вероятности ошибки элемента сигнала ( $p_{\text{ош.}}$ ) на фоне нормальной стационарной помехи [1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11], выраженную как функцию  $p_{\text{ош.}}(h_0^2)$  отношения средней энергии сигнала к спектральной плотности помехи  $h_0^2$  на входе приемного устройства. Основываясь на приведенных в источниках [1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11] выводах, будем полагать, для физических каналов исследуемой коммуникационной системы характерны рэлеевские замирания сигнала с аддитивной помехой в виде нормального шума при некогерентном приеме. В этом случае, вероятность ошибки элемента сигнала определяется выражением [2, 8, 11]:

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{h_0^2 + 2}. \quad (3.3.1)$$

Сбор статистических данных выполняется узлами в физических каналах  $E_{\text{УС}}$  в ходе обмена кадрами управления (приложение А.1). Принимая кадр управления, передаваемый соседним узлом, в канале  $e_{\text{УС.}i} \in E_{\text{УС}}$ , текущий узел определяет величину  $p_{\text{ош.}i}$ . Требования обмена кадрами управления возникают в случайные моменты времени.

Для получения оценки качества принимаемого сигнала от заданного соседнего узла с определенным периодом используются объявления Hello (раздел 2.5), где период рассылки равен  $T_{\text{Hello}}$  (2.5.1). Отсутствие кадра Hello в течение  $T_{\text{Hello}}$  означает отказ физического канала, при этом  $p_{\text{ош.}i} = 1$ .

Полученные значения  $\{p_{\text{ош.}i}\}$  формируют последовательность дискретных оценок качества сигнала, принимаемого от заданного соседнего узла в физическом канале  $e_{\text{УС.}i} \in E_{\text{УС}}$  на интервале времени  $[t_i, t_i + T_{\text{оос}}]$ .

Использование только  $p_{\text{ош}}$  для оценки надежности физических каналов недостаточно [2, 8]. Следует выполнять оценку надежности физического канала с вероятностью ошибки элемента сигнала  $p_{\text{ош}}$  меньше допустимой  $p_{\text{ош,доп}}$  при известной экспериментальной статистике сигналов и помех на локальных интервалах квазистационарности [8]:

$$p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош,доп}}, \quad (3.3.2)$$

где  $p_{\text{ош,доп}}$  – допустимое значение вероятности ошибки элемента сигнала, которое задается исходя из требований надежности передачи данных.

Для оценки надежности передачи кадров используется критерий – вероятность надежности приема дискретного сообщения ( $P_{\text{нпдс}}$ ) [8, 108]:

$$P_{\text{нпдс}}(p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош,доп}}) = \int_0^{p_{\text{ош,доп}}} w(p_{\text{ош}}) dp_{\text{ош}} = P(z > z_{\text{доп}}) = \int_{z_{\text{доп}}}^{\infty} w(z) dz = F\left(\frac{\bar{z} - z_{\text{доп}}}{\sigma_z}\right), \quad (3.3.3)$$

где  $w(p_{\text{ош}}(z))$  – плотность распределения вероятностей случайного превышения в канале уровней сигнал/помеха;  $z$  – разность уровней сигналов и помех на входе узла в децибелах и определяется выражением (1.3.5);  $\bar{z}$  – значение  $z$ , которое вычисляется на интервале  $T_{\text{оос}}$  методом скользящего окна;  $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$  – интегральная функция вероятности ошибки;  $x = \frac{\bar{z} - z_{\text{доп}}}{\sigma_z \sqrt{2}}$ ;  $z_{\text{доп}}$  – допустимое отношение уровней сигнала и помехи.

Используя выражение (3.3.3) на множестве вероятностей ошибки элемента сигнала  $\{p_{\text{ош},i}\}$ , для каждого физического канала за период  $T_{\text{оос}}$  формируется множество оценок  $\{P_{\text{нпдс},i}\}$  надежности прима дискретных сообщений, передаваемых заданным соседним узлом (приложение Б.1, таблица Б.1.1). Полученная последовательность  $\{P_{\text{нпдс},i}\} \forall e_{\text{ус},i} \in E_{\text{ус}}$  является дискретной, у которой существенные изменения качества происходят в случайные моменты  $t_i$  и  $t_{i+1}$ , а в промежутках между ними оценка качества канала является стационарной с постоянными статистическими параметрами: средним значением и среднеквадратическим отклонением.

В подавляющем числе случаев распределение длительностей выбросов помех и интервалов между ними на условно пороговых уровнях физических каналов соответствуют экспоненциальному закону распределения [2, 8]. Свойства физической среды исследуемой коммуникационной системы изменяются с периодом квазистационарности  $T_{\text{кск}}$  (2.5.3). Это дает возможность применять методы прогнозирования стационарных процессов к квазистационарным. Тогда, готовность  $e_{\text{ус},i} \in E_{\text{ус}}$  канала к непрерывной передаче данных на интервале времени  $[t_i, t_i + T_{\text{оос}}]$  является стационарной, т.е. не претерпевает значительных изменений в течение времени наблюдения.

Для прогнозирования состояния физических каналов на период  $[t_i, t_i + T_{00C}]$  используется метод экстраполяции к полученной последовательности  $\{P_{\text{НПДС},i}\}$  [108]. Применяя метод скользящего окна, выполняется расчет коэффициентов аппроксимирующего полинома, методом наименьших квадратов. Найденные коэффициенты полинома позволяют выполнить расчет значения зависимой переменной  $P_{\text{ИСК},i}$  однофакторной регрессионной полиномиальной модели относительно исходной последовательности  $\{P_{\text{НПДС},i}\}$  [100, 109]. При поиске значений зависимой переменной использовались стандартные функции статистических вычислений (polyfit, polyval) пакета программ Matlab [110]. Полученное значение  $P_{\text{ИСК},i}$  есть прогнозируемая на период  $[t_i, t_i + T_{00C}]$  оценка вероятности исправного состояния канала, определяющая вероятность успешного приема текущим узлом кадров, передаваемых заданным соседним узлом в заданном физическом канале  $e_{\text{УС},i} \in E_{\text{УС}}$  с заданной достоверностью.

Для последующего построения элементов линии передачи данных: трассы установления соединения и трассы передачи данных требуется определить интенсивности отказов и восстановлений каналов  $e_{\text{УС},i} \in E_{\text{УС}}$  на интервале  $[t_i, t_i + T_{00C}]$ . Для каждого полученного  $i$ -го кадра текущий узел определяет  $P_{\text{НПДС},i}$ . Длительность кадра среды установления соединения составляет  $T_{\text{к.СУС}}$  (приложение А.1). Физический канал представляет собой восстанавливаемую систему, состоящую из одного элемента с экспоненциальным законом распределения времени до возникновения отказа и восстановления. На интервале  $T_{\text{к.СУС}}$  восстановление канала можно считать мгновенным. В этом случае интенсивность отказов физического канала  $e_{\text{УС},i} \in E_{\text{УС}}$  тождественно равна параметру потока отказов – производной среднего числа отказов объекта в момент времени  $t$ . Статистически поток отказов определяется выражением [18]:

$$\lambda \equiv \omega(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (3.3.4)$$

где  $n(t, t + \Delta t)$  – есть количество элементов объекта, отказавших за время  $\Delta t$ ; т.к. элементом является кадр, то  $\Delta t = T_{\text{к.СУС}}$ ;  $N_0$  – есть исходное количество исправных элементов на момент времени  $t$ . Т.к. оценка интенсивности отказов выполняется для одного кадра, то  $N_0 = 1$ . Следовательно,  $0 \leq n(t, t + \Delta t) \leq N_0$ . Тогда, выражение 3.3.4 примет следующий вид:

$$\lambda_{e_{\text{УС},i}} = \frac{1 - P_{\text{НПДС},i}}{T_{\text{к.СУС}}}. \quad (3.3.5)$$

При экспоненциальном законе распределения времени до возникновения отказов и восстановлений коэффициент готовности одиночного элемента определяется выражением [18]:

$$F_{e_{\text{УС},i}}(t) = \frac{\mu_{e_{\text{УС},i}}}{\lambda_{e_{\text{УС},i}} + \mu_{e_{\text{УС},i}}} + \frac{\lambda_{e_{\text{УС},i}}}{\lambda_{e_{\text{УС},i}} + \mu_{e_{\text{УС},i}}} * e^{-(\lambda_{e_{\text{УС},i}} + \mu_{e_{\text{УС},i}})t}. \quad (3.3.6)$$

При стационарном режиме ( $t \rightarrow \infty$ ) на основе (3.3.5) получаем выражение для интенсивности восстановления канала при приеме одного кадра длительностью  $T_{\text{к.СУС}}$ :

$$\mu_{e.УС.i} = \frac{\lambda_{e.УС.i}}{P_{\text{НПДС.i}} - 1}. \quad (3.3.7)$$

Оценки надежности физического канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  представляют собой кусочно-нормальную последовательность, у которой изменения качества происходят в моменты  $t_i$  и  $t_{i+1}$ , а в промежутках между ними оценка качества совпадает с отрезками нормальной стационарной последовательности с постоянными статистическими параметрами:  $P_{\text{НПДС.e.i}}, \lambda_{e.УС.i}, \mu_{e.УС.i}$  [108].

В течение интервала времени  $T_{\text{ООС}}$  каждый узел выполняют  $n$  оценок качества сигналов, принимаемых от каждого соседнего узла, что позволяет определить средние значения надежности, интенсивностей отказов и восстановлений каждого физического канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  на интервале  $[t_i, t_i + T_{\text{ООС}}]$ :

$$\lambda_{e.УС} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{e.УС.i}; \quad \mu_{e.УС} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{e.УС.i}. \quad (3.3.8)$$

Для анализа полученных зависимостей, определяющих качество физических каналов при приеме сигналов соседних узлов выполнено математическое моделирование процесса приема кадров управления от соседнего узла при изменениях интенсивности помех и следующих исходных данных:

- $40\text{дБ} = z$  – принятое среднее значение отношения сигнал/помеха (1.3.8);
- изменения  $z$  соответствуют нормальному закону распределения случайной величины;
- $\sigma_z = 10\text{ дБ}$  – принятое среднеквадратическое отклонение отношения сигнал/помеха [8];
- $p_{\text{ош.доп.}} = 10^{-3}$  – допустимая вероятность ошибки элемента сигнала (1.3.4);
- $T_{\text{ООС}} = 224\text{с.}$  – период обновления отношений соседства (приложение А.8);
- $n = 64$  – количество измерений.

На рисунке 3.3.1 показана исходная последовательность значений вероятности ошибки элемента сигнала  $\{p_{\text{ош.i}}\}$ , соответствующая нормальному распределению случайной величины.

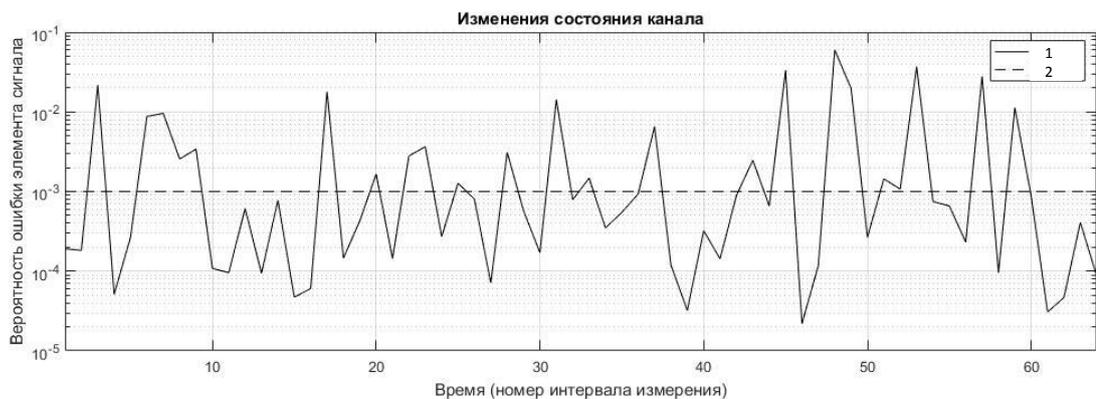


Рисунок 3.3.1 Изменения состояния канала; вероятность ошибки элемента сигнала (1), допустимая вероятность ошибки элемента сигнала (2)

Зависимостью 1 – вероятность ошибки элемента сигнала  $\{p_{\text{ош.i}}\}$  на интервале математического моделирования, где  $t = 64$  отсчета. Зависимость 2 – уровень допустимой

ошибки элемента сигнала  $p_{\text{ош.доп.}} = 10^{-3}$ . Численные результаты исходной последовательности  $\{p_{\text{ош.}i}\}$  приведены в таблице Б.1.2 (приложение Б.1).

Для каждого значения  $p_{\text{ош.}i}$ , используя (3.3.3), получены значения вероятности надежного приема дискретных сообщений  $P_{\text{НПДС.}i}$ , показанные на рисунке 3.3.2 (зависимость 1). В результате экстраполяции  $\{P_{\text{НПДС.}i}\}$  получена зависимость вероятности исправного состояния канала  $\{P_{\text{ИСК.}i}\}$ , обозначенная на рисунке 3.3.2 номером 2.

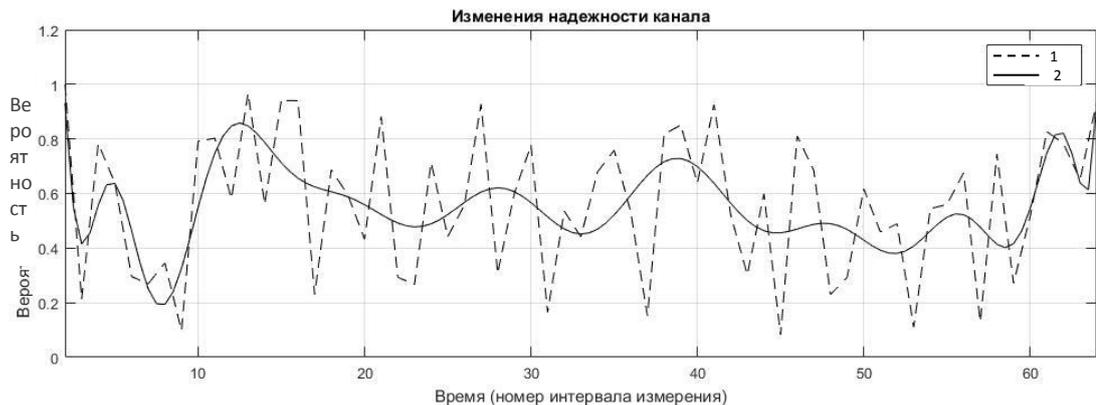


Рисунок 3.3.2 Изменения надежности канала; вероятность надежного приема дискретного сообщения (1); вероятность исправного состояния физического канала (2)

Численные результаты математического моделирования вероятности надежного приема дискретного сообщения и исправного состояния физического канала приведены в таблице Б.1.2 (приложение Б.1).

Анализ полученных результатов показывает, что значения  $P_{\text{НПДС.}i}$  зависят от изменений  $z$  на интервале  $[t_{\text{оос.}i-1}, t_{\text{оос.}i}]$ . Так,  $0.082 \leq P_{\text{НПДС}} \leq 1$  при  $2.2e - 5 \leq p_{\text{ош.}} \leq 0.059$ , где среднее  $\overline{P_{\text{НПДС}}} = 0.5667$ , при  $\sigma_{\text{НПДС}} = 0.2607$ . Диапазон изменений прогнозируемой оценки надежности канала составил  $0.19 \leq P_{\text{ИСК.}} \leq 1$ , где среднее значение  $\overline{P_{\text{ИСК.}}} = 0.56$  при  $\sigma_{\text{ИСК.}} = 0.149$ .

Таким образом, используя предложенный метод, каждый узел на основе сбора и обработки статистических данных, получаемых в ходе приема дискретных сообщений, для каждого соседнего узла определяет прогнозируемую на следующий период обновления отношения соседства надежность физических каналов по следующим параметрам:

- вероятность исправного состояния канала,
- интенсивности отказов и восстановлений канала при приеме кадров от заданного соседнего узла.

Предложенный метод получения прогнозируемой оценки надежности позволяет получать:

- оценку надежность относительно заданного допустимого значения;
- усредненную оценку состояния канала к моменту обновления отношений соседства;

- оценку надежности с периодом не превышающем период квазистационарности физического канала;
- адаптивную оценку качества каждого физического канала, используемого соседними узлами при обмене данными.

Таким образом, определен метод оценки надежности канала связи на основе: сбора статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов, указания пороговых значений качества, формирования последовательности вероятностей надежного приема дискретных сообщений и получения прогнозируемой на период обновления отношений соседства вероятности исправного состояния канала на основе метода экстраполяции к полученной последовательности. Идентифицированы параметры оценки качества каналов связи: вероятность исправного состояния канала, интенсивности отказов и восстановлений, прогнозируемые на период обновления отношений соседства.

### **3.4. Структурно-параметрический синтез трассы установления соединения в пространстве параметров надежности**

В соответствии с принятой структурой линии передачи данных (раздел 3.2) обмен данными между соседними узлами начинается с установления соединения, выполняемого средствами трассы установления соединения, основу которой составляют каналы  $E_{УС}$ . Для каждого физического канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  (раздел 3.3) были получены зависимости: вероятность исправного состояния канала  $P_{ИСК.}$ , интенсивности  $\lambda_{e.УС}$  отказов и восстановлений  $\mu_{e.УС}$ . Указанные оценки качества каналов  $E_{УС}$  выполняются каждым узлом для каждого отношения соседства и корректируются с интервалом  $T_{ООС}$ .

Полученные оценки качества определяют состояние канала  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  на входах узлов участников обмена данными. Тогда, заданный физический канал  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  и инцидентные ему узлы, образуют систему передачи данных – среду установления соединения  $СУС_i$ .

В случае неудачной попытки установления соединения повторные попытки выполняются узлами в следующих физических каналах и соответственно в следующих  $СУС_j$ . Множество физических каналов, используемых для попыток установления соединения, формируют для каждого отношения соседства систему передачи данных – трассу установления соединения.

#### **3.4.1. Разработка модели надежности среды установления соединения**

Среда установления соединения формируется в активном в момент времени  $t$  канале  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  и обеспечивает множественный доступ узлов коммуникационной системы.

Взаимодействие узлов в среде установления соединения выполняется в синхронном режиме с конкуренцией за среду (раздел 2.3). Время активности  $T_K$  (2.3.1) канала  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  разделено на  $n$  равных слотов длительностью  $T_{сл.СУС}$  (раздел 2.3). Попытки передачи кадров управления выполняются узлами синхронно с началом выбранного слота. Кадры управления передаваемые в среде установления соединения имеют фиксированный формата [приложение А.1], длительностью  $T_{кадр.СУС}$ , где:

$$T_{кадр.СУС} < T_{сл.СУС}. \quad (3.4.1.1)$$

Взаимодействие соседних узлов при индивидуальной адресации предусматривает отправку кадра квитанции на успешный прием кадра вызова (раздел 2.3). Тогда, между узлами  $(s, k)$  – участниками обмена данными в активном канале  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  формируется среда установления соединения. Надежность индивидуального вызова зависит от качества физической среды на входах соседних узлов. Отказ любого из участников соединения приводит к отказу среды установления соединения.

Тогда, в соответствии с алгоритмом индивидуального вызова (раздел 2.3), среда установления соединения есть восстанавливаемая система с основным соединением элементов [108]. Различия в условиях приема на входа пространственно-разнесенных узлов  $(s, k)$  в канале  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  в последовательные моменты времени  $t_i$  и  $t_i + T_{сл.СУС}$  позволяют рассматривать  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  как два последовательных элемента системы (рисунок 3.4.1.1):

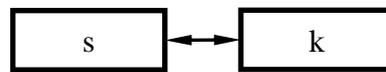


Рисунок 3.4.1.1 Структурная схема среды установления соединения;  $s$  – вызывающий узел;  $k$  – вызываемый узел

Будем полагать, что элементы независимы по отказам и не ограничены в восстановлении. Узлы  $s$  и  $k$ , используя метод (раздел 3.3) в течении  $[t_i, t_i + T_{00с}]$  определяют интенсивности отказов  $\lambda_{e_{yc.i}}$  и восстановлений  $\mu_{e_{yc.i}}$  (3.3.8) каждого, связывающего их, физического канала  $e_{yc.i} \in E_{yc}$ . По истечении  $T_{00с}$  соседние узлы выполняют обмен полученными оценками надежности физических каналов. Это позволяет каждому узлу  $(s, k)$  для каждого физического канала  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  определить надежность формируемой между  $s$  и  $k$   $СУС_i$ . Оценка надежности каждой  $СУС_i$  является прогнозируемой стационарной на период  $[t_i, t_i + T_{00с}]$ .

Для оценки надежности среды установления соединения на основе алгоритма индивидуального вызова (раздел 2.3) и параметров надежности физической среды  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  строится модель надежности среды установления соединения [104, 108], граф состояний которой представлен на рисунке 3.4.1.2.

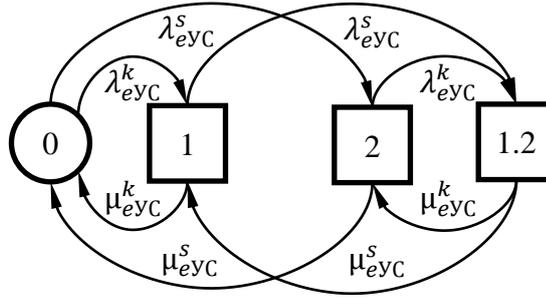


Рисунок 3.4.1.2 Граф среды установления соединения;  $\lambda_{eуc}^s, \lambda_{eуc}^k$  – интенсивности отказов элементов (s, k);  $\mu_{eуc}^s, \mu_{eуc}^k$  – интенсивности восстановления элементов s, k

Состояние системы – СУС<sub>i</sub> между узлами s, k показано вершинами графа:

- 0: СУС<sub>i</sub> находится в исправном состоянии;
- 1:  $P_{ИСК.i}^k < P_{ИСК.доп.}$  – элемент k неисправен, где  $P_{ИСК.доп.}$  – допустимая вероятность исправного состояния канала; элемент s находится в исправном состоянии и ожидает восстановления k; СУС<sub>i</sub> – восстанавливается;
- 2:  $P_{ИСК.i}^s < P_{ИСК.доп.}$  – элемент s неисправен; элемент k находится в исправном состоянии ожидает восстановления s; СУС<sub>i</sub> – восстанавливается;
- 1.2:  $P_{ИСК.i}^k < P_{ИСК.доп.}$  – неисправен элемент k;  $P_{ИСК.i}^s < P_{ИСК.доп.}$  – неисправен элемент s; СУС<sub>i</sub> – восстанавливается.

Функционирование СУС<sub>i</sub> отражено системой дифференциальных уравнений Колмогорова [18]:

$$\begin{cases} p_0'(t) = -(\lambda_{eуc}^k + \lambda_{eуc}^s)p_0(t) + \mu_{eуc}^k p_1(t) + \mu_{eуc}^s p_2(t) \\ p_1'(t) = \lambda_{eуc}^k p_0(t) - (\mu_{eуc}^k + \lambda_{eуc}^s)p_1(t) + \mu_{eуc}^s p_{1.2}(t) \\ p_2'(t) = \lambda_{eуc}^s p_0(t) - (\mu_{eуc}^s + \lambda_{eуc}^k)p_2(t) + \mu_{eуc}^k p_{1.2}(t) \\ p_{1.2}'(t) = \lambda_{eуc}^s p_1(t) + \lambda_{eуc}^k p_2(t) - (\mu_{eуc}^k + \mu_{eуc}^s)p_{1.2}(t) \end{cases} \quad (3.4.1.2)$$

Для любого момента времени t:

$$p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_{1.2}(t) = 1. \quad (3.4.1.3)$$

Решение системы уравнений (3.1.2) выполняем при начальных условиях:

$$p_0(0) = 1; p_1(0) = p_2(0) = p_{1.2}(0) = 0. \quad (3.4.1.4)$$

В результате решения системы уравнений (3.4.1.2), с учетом (3.4.1.3-4) получено выражение стационарной вероятности нахождения системы в исправном состоянии:

$$p_0 = \frac{\mu_{eуc}^k \mu_{eуc}^s}{(\lambda_{eуc}^k + \mu_{eуc}^k) * (\lambda_{eуc}^s + \mu_{eуc}^s)}. \quad (3.4.1.5)$$

В результате преобразование (3.4.1.5) получено выражение коэффициента готовности СУС<sub>i</sub> в стационарном режиме:

$$F_{СУС.i} = \frac{1}{\prod_j \rho_j + \sum_i \rho_j + 1}, \quad (3.4.1.6)$$

где  $F_{СУС.i} \equiv p_0$ ;  $\rho_i = \frac{\lambda_{eУС}^j}{\mu_{eУС}^j}$ , где  $j = s, k$ .

В результате математического моделирования получена зависимость коэффициента готовности  $F_{СУС.i}$  среды установления соединения  $СУС_i$  от качества физической среды на входах узлов  $(s, k)$ , взаимодействующих в физическом канале  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  (рисунок 3.4.1.3).

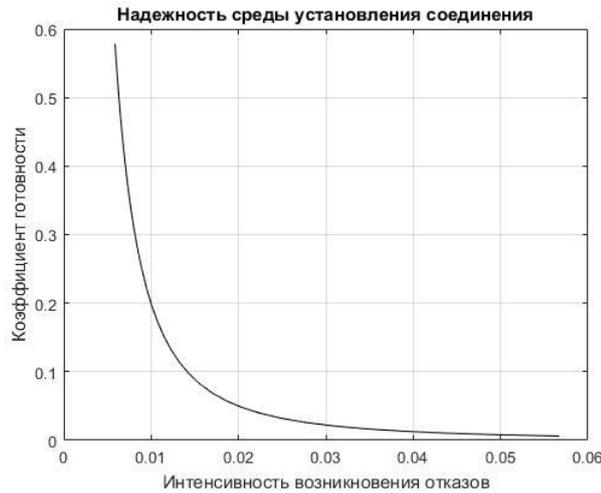


Рисунок 3.4.1.3 Зависимость коэффициента готовности среды установления соединения от интенсивности отказов физического канала

При выполнении моделирования были приняты следующие условия и исходные данные, полученные при определении надежности физического канала (раздел 3.3; приложение Б.1, таблица Б.1.1):

- диапазон изменений интенсивности отказов канала на входе узла:  $0.0059 \leq \lambda_{eУС}^j \leq 0.057$ , где  $j = s, k$ , что соответствует условию (1.3.5);
- диапазон изменений интенсивности восстановления канала на входе узла:  $0.0048 \leq \mu_{eУС}^j \leq 0.019$ , где  $j = s, k$ ;
- равенство  $\lambda_{eУС}^k = \lambda_{eУС}^s$  и  $\mu_{eУС}^k = \mu_{eУС}^s$ .

В результате моделирования диапазон изменений показателя коэффициента готовности среды установления соединения составил:  $0.0062 \leq F_{СУС} \leq 0.578$  (таблица Б.2.1, приложение Б.2).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о снижении надежности системы – среды установления соединения по сравнению с надежностью составляющих её элементов (раздел 3.3), что объясняется последовательным соединением элементов. Так, вероятность надежного приема дискретных сообщений элементом среды установления соединения составил  $0.0079 \leq P_{НПДС} \leq 0.76$  (таблица Б.1.1, приложение Б.1). Для увеличения надежности установления соединения требуется использовать дополнительные попытки выполнения индивидуального вызова в резервных каналах  $E_{УС}$ .

Для исследования зависимости коэффициента готовности среды установления соединения, использовалась последовательность случайных нормальных значений интенсивностей отказов  $\lambda_{eуc}^j$  и восстановлений  $\mu_{eуc}^j$ , полученных на основе нормальной последовательности исправного состояния канала  $\{P_{иск}\}$  (раздел 3.3; таблица Б.1.2, приложение Б.1). Результаты математического моделирования показаны на рисунке 3.4.1.4.

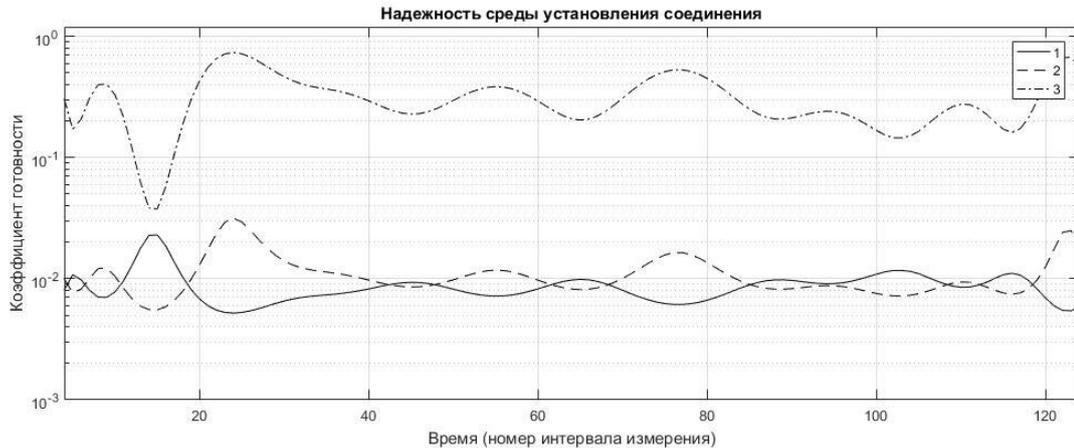


Рисунок 3.4.1.4 Надежность среды установления соединения; коэффициент готовности среды установления соединения (3); интенсивности отказов (1) и восстановлений (2)

При выполнении математического моделирования показатели параметров качества физического канала и среды установления соединения изменялись в диапазонах:

- интенсивность отказов канала:  $0.0048 \leq \lambda_{eуc}^j \leq 0.023$  при среднем значении  $\overline{\lambda_{eуc}^j} = 0.0087$ ;  $\sigma_{\lambda_{eуc}^j} = 0.0028$ ;
- интенсивность восстановления канала:  $0.0055 \leq \mu_{eуc}^j \leq 0.06$  при среднем значении  $\overline{\mu_{eуc}^j} = 0.012$ ;  $\sigma_{\mu_{eуc}^j} = 0.0065$ ;
- коэффициент готовности среды установления соединения:  $0.037 \leq F_{сyс} \leq 0.86$  при среднем значении  $\overline{F_{сyс}} = 0.32$ ;  $\sigma_{F_{сyс}} = 0.157$ .

Численные результаты моделирования приведены в таблице Б.2.2, приложение Б.2.

Анализ полученных результатов подтверждает снижение надежности среды установления соединения в сравнении с надежностью каналов  $E_{уc}$ . Так, средние значения параметров надежности среды установления соединения и её элементов составили:

- надежного приема дискретного сообщения:  $\overline{P_{нпдс}} = 0.5667$ , при  $\sigma_{нпдс} = 0.2607$  (приложение Б.1, таблица Б.1.2);
- исправного состояния канала  $\overline{P_{иск}} = 0.56$  при  $\sigma_{иск} = 0.149$  (приложение Б.1, таблица Б.1.2);

- коэффициент готовности среды установления соединения: среднем значении  $\overline{F_{CUC}} = 0.32$  при  $\sigma_{F_{CUC}} = 0.157$  (таблицы Б.2.2, Б.2.3; приложение Б.2).

Численные результаты моделирования приведены в таблице Б.2.2 (приложение Б.2). Различия в условиях приема сигналов пространственно-разнесенных узлов и нестационарность физических каналов приводят к снижению  $F_{CUC}$ . Для увеличения надежности обмена управляющими сообщениями требуется ввести резервирование системы.

Как было сказано ранее, среда установления соединения есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов. Тогда, интенсивность возникновения отказов среды равна сумме интенсивностей отказов её элементов [18, 100, 107, 111]:

$$\lambda_{CUC} = \sum_i \lambda_i, \quad (3.4.1.7)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента;  $i = \{s, k\}$ .

Тогда, среднее время наработки на отказ среды установления соединения определяется равенством [18]:

$$T = \frac{1}{\sum_i \lambda_i}. \quad (3.4.1.8)$$

Так как, коэффициент готовности системы определяется отношением [18]:

$$F_{CUC} = \frac{T}{T+T_B}, \quad (3.4.1.9)$$

где  $T_B$  – среднее время восстановления системы.

Используя выражения (3.4.1.6 – 3.4.1.9) получена зависимость среднего времени восстановления системы:

$$T_B = \frac{1-F_{CUC}}{F_{CUC} \cdot \lambda_{CUC}}. \quad (3.4.1.10)$$

Тогда, интенсивность восстановления среды установления соединения определяется выражением:

$$\mu_{CUC} = \frac{1}{T_B} = \frac{F_{CUC} \cdot \lambda_{CUC}}{1-F_{CUC}}. \quad (3.4.1.11)$$

Таким образом, в результате моделирования надежности получены зависимости коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений среды установления соединения, формируемой между соседними узлами в заданном физическом канале  $e_{uc.i} \in E_{uc}$ . Значение коэффициента готовности определяет вероятность успешного выполнения транзакции индивидуального вызова для заданного отношения соседства в заданном физическом канале. Полученные значения коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений являются прогнозируемыми и стационарными на следующий период обновления отношений соседства.

Среда установления соединения есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов. Анализ результатов выполненного математического моделирования показывает, что надежность среды установления соединения не превышает надежность составляющих её элементов. Так:

- среднее значение коэффициента готовности среды установления соединения составило  $\overline{F_{\text{СУС}}} = 0.32$ ;  $\sigma_{F_{\text{СУС}}} = 0.157$ ;
- при среднем значении надежности физических каналов  $e_{\text{УС},i} \in E_{\text{УС}}$ :  $\overline{P_{\text{ИСК}}} = 0.56$ ;  $\sigma_{\text{ИСК}} = 0.149$ .

Отказом среды является неудачное выполнение транзакции индивидуального вызова, вызванное снижением качества принимаемого сигнала на входе хотя бы одного из элементов среды.

Помехи, действующие на входах узлов, разделяются на фоновые и интерференционные. Физические каналы отличаются уровнями и интенсивностями фоновых помех (раздел 3.3). Следовательно, при неудачной транзакции индивидуального вызова (раздел 2.3) необходимо выполнить смену физического канала. Однако, интерференционные помехи вызваны конкуренцией узлов за среду, что не зависит от смены каналов (раздел 2.3). Тогда для повышения надежности в условиях конкуренции за среду необходимо:

- выполнение повторных попыток выполнения транзакции (раздел 2.3);
- использование случайных интервалов ожидания выполнения повторной попытки выполнения индивидуального вызова (раздел 2.3);
- перераспределение информационных потоков по альтернативным линиям передачи данных.

Для повышения надежности выполнения этапа установления соединения в условиях нестационарности физических каналов и различий в условиях приема пространственно-разнесенных узлов требуется использовать повторные попытки установления соединения, каждая из которых в соответствии с заданным алгоритмом выполняется в следующем физическом канале. Тем самым на основе отдельных сред установления соединения создается резервированная система, обеспечивающая повышение надежности установления соединения.

Полученные зависимости интенсивностей отказов и восстановлений среды установления соединения являются компонентами оценки надежности трассы установления соединения и линии передачи данных.

### 3.4.2. Разработка модели надежности трассы установления соединения

Использование отдельных физических каналов для выполнения индивидуального вызова в условиях нестационарности параметров физической среды и различий в условиях приема пространственно-разнесенных узлов не позволяет организовать обмен данными с заданной надежностью по типу каждый с каждым (разделы 2.3, 3.4.1).

В соответствии с принятым методом доступа к СУС (раздел 2.3) узлы синхронно выполняют смену активных каналов  $E_{УС}$  с периодом равным  $T_K$ . Для обмена служебными данными используется активный физический канал  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ , в котором между соседними узлами создается СУС<sub>*i*</sub> (раздел 3.4.1). Обмен служебными сообщениями выполняется в соответствии с алгоритмами индивидуального и широковещательного вызова (раздел 2.3).

Циклическая смена каналов позволяет организовать единую среду взаимодействия узлов. Данная среда значительно менее зависима от влияния помех, сосредоточенных в отдельных физических каналах и имеет период исправного действия, значительно превышающий период квазистационарности отдельных физических каналов.

В случае отказа СУС<sub>*i*</sub> (раздел 3.4.1) вызывающий узел выполнит повторные попытки в индивидуального вызова в следующих каналах СУС<sub>*i+n*</sub> при их переходе в активное состояние. Допустимое количество попыток индивидуального вызова не превышает  $r$ . Тогда, совокупность из  $r$  каналов  $\{e_{УС.i}\} \in E_{УС}$ , используемых узлом источником  $s$  для выполнения индивидуального вызова соседнего узла назначения  $k$  образуют резервированную систему передачи данных – трассу установления соединения.

Элементами трассы установления соединения являются среды установления соединения (раздел 3.4.1). В ходе взаимодействия каждый узел для каждого отношения соседства в каждом канале формирует среды установления соединения и определяет показатели их надежности:

- коэффициент готовности  $F_{СУС.i}$  (3.4.1.6),
- интенсивности отказов  $\lambda_{СУС.i}$  (3.4.1.7) и восстановлений  $\mu_{СУС.i}$  (3.4.1.11).

Алгоритм установления соединения (раздел 2.3) между соседними узлами  $\{s, k\}$  предусматривает предельное количество неудачных попыток обмена данными  $r$ . Каждой повторной попытке индивидуального вызова, выполняемой узлом – источником  $s$ , предшествует, ожидание наступления выбранного слота в активном на момент попытки альтернативном канале  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ . Тогда, отказ трассы установления соединения есть превышение допустимого количества повторных попыток  $r$  при выполнении процедуры установления соединения. Следовательно, трасса установления соединения представляет собой

восстанавливаемую систему с общим резервированием замещением каналов  $\{e_{yc,i}\} \in E_{yc}$ . На рисунке 3.4.2.1 показана структурная схема трассы установления соединения.

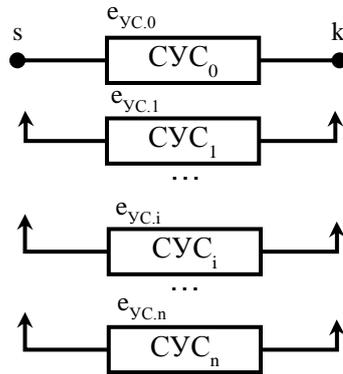


Рисунок 3.4.2.1 Структурная схема трассы установления соединения;  $СУС_i$  –  $i$ -я среда установления соединения, образованная каналом  $e_{yc,i} \in E_{yc}$ ;  $\{s, k\}$  – соседние узлы

Элементы трассы установления соединения имеют различные значения интенсивностей отказов  $\lambda_{сус,i}$  и восстановлений  $\mu_{сус,i}$ . Моменты возникновения требования обслуживания и повторных попыток передачи кадров вызова являются случайными величинами. Следовательно, точно определить, набор физических каналов и порядок их использования в составе трассы установления соединения не представляется возможным. Тогда, для оценки надежности трассы примем, что все элементы  $\{СУС_i\}$  характеризуются средними значениями интенсивностей отказов и восстановлений  $\lambda_{сус}, \mu_{сус}$ , полученными на множествах  $\{\lambda_{сус,i}\}$  и  $\{\mu_{сус,i}\}$ . На рисунке 3.4.2.2 показан граф состояний системы.

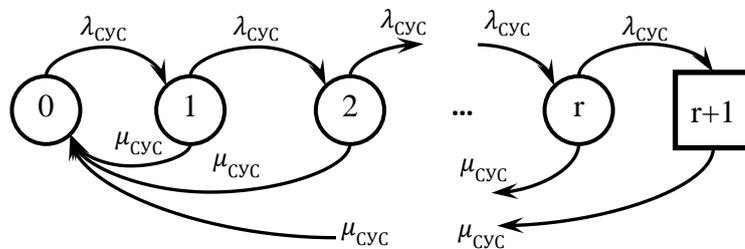


Рисунок 3.4.2.2 Граф состояний трассы установления соединения;  $\{0, 1, \dots, r, r + 1\}$  – состояния системы;  $\lambda_{сус}$  и  $\mu_{сус}$  – усредненные интенсивности отказов и восстановлений среды установления соединения СУС;  $r$  – количество повторных попыток установления соединения

Состояние системы – трасса установления соединения между узлами  $\{s, k\}$  показано вершинами графа:

- 0: трасса установления соединения находится в исправном состоянии;
- 1: отказ  $СУС_1$  (1-я неудачная попытка установления соединения); выполнена процедура выбора  $СУС_2$  для выполнения 2-й попытки установления соединения; трасса установления соединения – исправна;

- $i$ : отказ  $СУС_i$  ( $i$ -я неудачная попытка установления соединения); выполнена процедура выбора  $СУС_{i+1}$  для выполнения  $(i + 1)$ -й попытки установления соединения; трасса установления соединения – исправна;
- $(r + 1)$ : отказ  $СУС_r$  (исчерпаны все попытки установления соединения); трасса установления соединения – восстанавливается после отказа.

восстанавливается.

Функционирование трассы установления соединения отражено системой дифференциальных уравнений Колмогорова [18]:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -\lambda_{СУС}p_0(t) + \mu_{СУС}\sum_{i=1}^{r+1} p_i(t) \\ p'_1(t) = \lambda_{СУС}p_0(t) - (\lambda_{СУС} + \mu_{СУС})p_1(t) \\ \dots \\ p'_i(t) = \lambda_{СУС}p_{i-1}(t) - (\lambda_{СУС} + \mu_{СУС})p_i(t) \\ \dots \\ p'_{r+1}(t) = \lambda_{СУС}p_r(t) - \mu_{СУС}p_{r+1}(t) \end{cases} \quad (3.4.2.1)$$

Для любого момента времени  $t$ :

$$\sum_{i=0}^{r+1} p_i(t) = 1. \quad (3.4.2.2)$$

Решение системы уравнений (3.4.2.1) выполняется при начальных условиях:

$$p_0(0) = 1; p_i(0) = 0; i = 1, 2, 3, \dots, (r + 1); r \leq n, \quad (3.4.2.3)$$

где  $n = |E_{УС}|$  – количество каналов установления соединения.

В результате решения системы уравнений (3.4.2.1), получено выражение стационарной вероятности нахождения системы в состоянии восстановления после отказа  $p_{r+1}(t)$  для стационарного состояния системы (при  $t \rightarrow \infty$ ):

$$p_{r+1} = \frac{\lambda_{СУС}^{(r+1)}}{(\lambda_{СУС} + \mu_{СУС})^{(r+1)}}. \quad (3.4.2.4)$$

Тогда, коэффициент готовности трассы установления соединения определяется следующим выражением:

$$F_{ТУС} = 1 - p_{r+1}. \quad (3.4.2.5)$$

Полученный коэффициент готовности является стационарным показателем на интервале времени  $[t_i, t_i + T_{00С}]$  и определяет вероятность исправного состояния трассы установления соединения при попытке выполнения индивидуального вызова.

В результате математического моделирования получена зависимость коэффициента готовности трассы установления соединения от интенсивности отказов среды установления соединения, где количество каналов, используемых при формировании трассы установления соединения, составило:  $r = \{1, 2, 4, 6, 8\}$  (рисунок 3.4.2.3). Исходными данными для выполнения моделирования принят диапазон значений интенсивности отказов среды установления соединения  $0.0117 \leq \lambda_{СУС} \leq 0.1134$  (приложение Б.2., таблица Б.2.1), полученный в разделе

(3.4.1). Численные результаты математического моделирования приведены в таблице Б.3.1 (приложение Б.3).

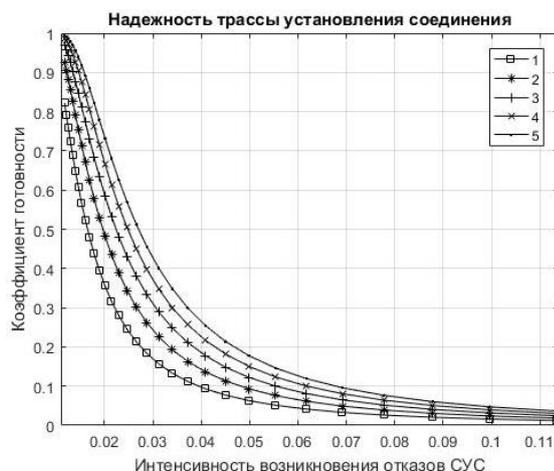


Рисунок 3.4.2.3 Зависимость коэффициента готовности трассы установления соединения от интенсивности отказов среды установления соединения;  $r$  – количество используемых каналов:  $r=1$  (1);  $r=2$  (2);  $r=4$  (3);  $r=6$  (4);  $r=8$  (5)

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение количества используемых в составе трассы установления соединения элементов приводит к росту её надёжности. Так, диапазоны изменений коэффициента готовности трассы установления соединения при различных значениях  $r$  составили:

- $r = 1$ :  $0.0124 \leq F_{\text{ТУС}} \leq 0.8221$ , где  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.3187$ ;
- $r = 2$ :  $0.0185 \leq F_{\text{ТУС}} \leq 0.925$ , где  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.4032$ ;
- $r = 4$ :  $0.0246 \leq F_{\text{ТУС}} \leq 0.9684$ , где  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.4641$ ;
- $r = 6$ :  $0.0306 \leq F_{\text{ТУС}} \leq 0.9867$ , где  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.5102$ ;
- $r = 8$ :  $0.0366 \leq F_{\text{ТУС}} \leq 0.9944$ , где  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.5465$ .

Следовательно, применение трассы установления соединения позволяет повысить вероятность успешного выполнения процедуры установления соединения в условиях:

- различного качества приема сигналов на входах пространственно-разнесенных узлов;
- возможного несовпадения периодов квазистационарности отказов и восстановлений отдельных физических каналов;
- неудовлетворительного качества приема сигналов в отдельных физических каналах.

Следует учесть, что увеличение количества используемых элементов в составе трассы установления соединения увеличивает среднее время попытки обмена данными и среднее время определения отказа.

Для исследования зависимости коэффициента готовности трассы установления соединения, использовалась последовательность интенсивностей отказов среды установления

соединения  $\{\lambda_{\text{сус},i}\}$  (таблица Б.2.2, приложение Б.2), полученная в результате моделирования в разделе (3.4.1) и соответствующая нормальному закону распределения случайной величины. Результаты математического моделирования надежности трассы установления соединения предложенным методом показаны на рисунке 3.4.2.4. Численные результаты математического моделирования приведены в таблице Б.3.2, Б.3.3, Б.3.4 (приложение Б.3).

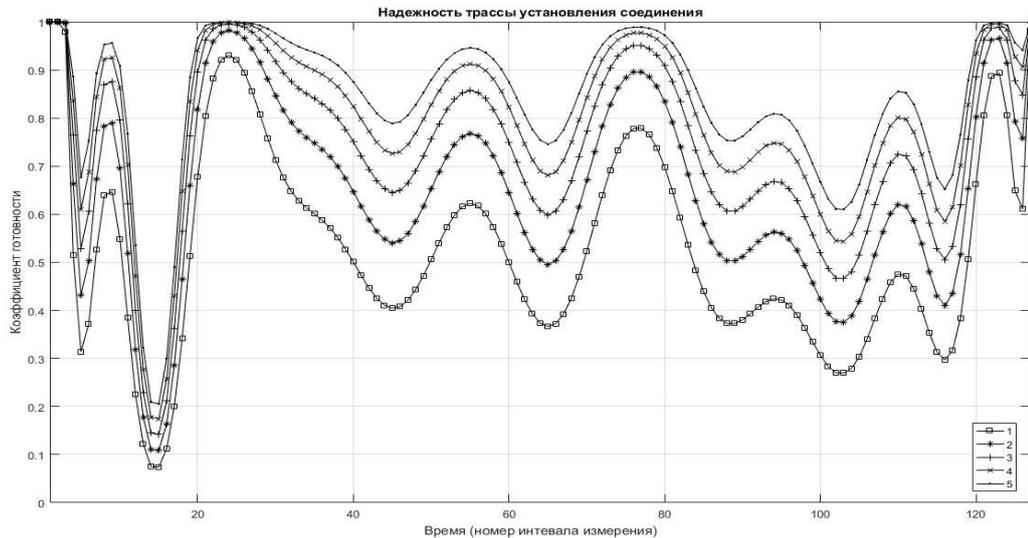


Рисунок 3.4.2.4 Изменения коэффициента готовности трассы установления соединения;  $r$  – количество используемых каналов:  $r=1$  (1);  $r=2$  (2);  $r=4$  (3);  $r=6$  (4);  $r=8$  (5)

Анализ результатов математического моделирования подтверждает, что надежность трассы установления соединения превышает надежность среды установления соединения при  $r > 1$ , где  $r$  – количество каналов, используемых при формировании трассы. Так, средние значения коэффициента готовности трассы установления соединения, полученные на интервале моделирования, при различных значениях  $r$  составили:

- $r = 1$ :  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.5274$  при  $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.203$ ;
- $r = 2$ :  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.651$  при  $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.197$ ;
- $r = 4$ :  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.7357$  при  $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.1835$ ;
- $r = 6$ :  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.7959$  при  $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.1689$ ;
- $r = 8$ :  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.8397$  при  $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.1553$ .

Рост числа используемых каналов при формировании трассы установления соединения увеличивает надежность выполнения операции установления соединения, а также снижает нестационарность системы.

Трасса установления соединения является элементом линии передачи данных. В соответствии с предложенной моделью (раздел 3.1), для оценки надежности линии требуется определить интенсивности отказов  $\lambda_{\text{ТУС}}$  и восстановлений  $\mu_{\text{ТУС}}$ , действующие на интервале

времени  $[t_i, t_i + T_{00C}]$ . Для восстановления трассы установления соединения требуется восстановление хотя бы одного элемента. При условии, что период восстановления системы с резервированием замещением определяется выражением [18]:

$$T_B = \frac{1}{(n+1)*\mu}, \quad (3.4.2.6)$$

где  $n$  – количество резервирующих элементов, имеющих одинаковую интенсивность восстановления;  $\mu$  – интенсивности восстановления системы. Тогда, период восстановления трассы установления соединения равен:

$$T_{TUC.B} = \frac{1}{(r+1)*\mu_{CUC}}, \quad (3.4.2.7)$$

где  $r$  – количество каналов, формирующих трассу, с одинаковой интенсивностью восстановления;  $\mu_{CUC}$  – интенсивность восстановления среды установления соединения. Следовательно, интенсивность восстановления трассы установления соединения равна:

$$\mu_{TUC} = (r + 1) * \mu_{CUC}. \quad (3.4.2.8)$$

Длительность периода исправного состояния (время наработки на отказ) восстанавливаемой системы с резервированием замещением определяется следующим выражением [18]:

$$T_{TUC} = \frac{F_{TUC}}{(1-F_{TUC})} * T_{TUC.B}. \quad (3.4.2.9)$$

На основе (3.4.2.9) определяется выражение интенсивности отказов трассы установления соединения:

$$\lambda_{TUC} = \frac{1}{T_{TUC}}. \quad (3.4.2.10)$$

В результате моделирования надежности получены зависимости коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений трассы установления соединения. Полученная в момент времени  $t_i$  оценка надежности трассы установления соединения является прогнозируемой и стационарной с постоянными статистическими параметрами на следующий период обновления отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{00C}]$ . Оценка надежности трассы есть вероятность успешного выполнения операции установления соединения в среде, образованной  $r$  каналами  $\{e_{YC.i}\} \in E_{YC}$ .

Анализ результатов математического моделирования показывает, что трасса установления соединения обеспечивает обмен данными между узлами с надежностью превышающей надежность обмена данными в отдельном физическом канале  $e_{YC.i} \in E_{YC}$ , что обеспечивается использованием множества резервных каналов.

Полученный метод позволяет узлам коммуникационной системы формировать среду множественного доступа обеспечивающую взаимодействие пространственно-удаленных узлов при нестационарности физической среды. Так:

- среднее значение коэффициента готовности трассы установления соединения при  $r = 4$  составило  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.7357$ ;  $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.1835$ ;
- при среднем значении надежности среды установления соединения:  $\overline{F_{\text{СУС}}} = 0.32$ ;  $\sigma_{F_{\text{СУС}}} = 0.157$ .

Отказом трассы является последовательность из  $r$  неудачных попыток индивидуального вызова, каждая из которых выполняется в следующей среде установления соединения.

Таким образом, в результате структурного синтеза в соответствии с принятыми алгоритмами обмена данными получена структура среды установления соединения, которая является элементов трассы установления соединения. Среда установления соединения есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов. В результате параметрического синтеза на основе параметров надежности каналов получены параметры надежности среды установления соединения: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показал, что среда установления соединения является нестационарной в следствие нестационарности используемых каналов связи, надежность среды установления соединения не превышает надежности каналов связи. Так, средняя значение коэффициента готовности среды установления соединения составил  $\overline{F_{\text{СУС}}} = 0.32$  ( $\sigma_{F_{\text{СУС}}} = 0.16$ ) при средней вероятности исправного состояния канала  $\overline{P_{\text{ИСК}}} = 0.56$  ( $\sigma_{\text{ИСК}} = 0.15$ ). Следовательно, для повышения надежности обмена данными необходимо агрегирование элементов – среда установления соединения в резервированную систему. В результате структурно-параметрического синтеза трассы установления соединения разработаны и синтезированы: структура и 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 ходе 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  $r = 4$  сред установления соединения, составило  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.74$  ( $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.18$ ) при среднем значении надежности среды установления соединения:  $\overline{F_{\text{СУС}}} = 0.32$  ( $\sigma_{F_{\text{СУС}}} = 0.16$ ).

### 3.5. Идентификация параметров надежности узла следующего перехода

В соответствии с принятой моделью (раздел 3.1) передача данных от узла источника  $s$  до удаленного узла назначения  $d$  выполняется средствами маршрутизации через промежуточные узлы  $k$ . Узлы  $(s, k)$  инцидентны линии передачи данных  $l_{sk}$ . В ходе выполнения процедуры установления соединения (разделы 2.3, 3.4) узел  $s$  выполняет запрос готовности узла следующего перехода  $k$  (рисунок 3.1.6).

На вход каждого узла следующего перехода с интенсивностью  $w_{зпд}$  поступают запросы обмена данными, прошедшие трассу установления соединения, а также формируемые самим узлом. Будем полагать, что время между последовательными запросами распределено по показательному закону. Поступивший запрос обрабатывается модулем доступа к среде передачи данных (разделы 2.2) в соответствии с алгоритмом передачи данных (раздел 2.4). Пусть, длительность обработки поступивших запросов также распределена по показательному закону. Тогда, функционирование модуля доступа к среде передачи данных соответствует системе массового обслуживания типа М/М/1 [20, 99].

В ответ на получение запроса обмена данными узел следующего перехода отвечает кадрами подтверждения или отказа в зависимости от текущего состояния: свободен или занят. Условием отказа является занятость модуля доступа к среде передачи данных, выполняющего передачу данных в момент поступления запроса. Тогда, в ответ на запрос передачи данных вызывающий узел  $s$  получит отказ и определит вызываемый узел  $k$  как находящийся в состоянии восстановления. Период восстановления узла зависит от времени выполнения процедуры передачи блока данных  $T_{БД}$ .

Пусть блок данных объемом  $D$  передается кадрами размера  $L_{кд}$ , в течение цикла передачи, состоящего из  $n$  транзакций передачи кадров данных. Передача данных выполняется в соответствии с принятым алгоритмом (раздел 2.4.2). В состав каждой успешной передачи кадра входит  $i$  неудачных попыток и одна успешная попытка передачи, где  $1 \leq i \leq (r - 1)$ ;  $r$  – предельное значение количества повторных попыток. Тогда, с учетом (2.4.2.4), математическое ожидание времени передачи блока данных равно [104,112]:

$$T_{ПД} = \sum_{j=1}^n [\sum_{i=1}^{r-1} [(Q_{п.к.} + P_{п.к.} * Q_{п.к.})^i * T_{т.пд.i}] + T_{т.пд.j}], \quad (3.5.1)$$

где  $n = D/L_{кд}$  – 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 (раздел 2.4).

Используя выражения интенсивности отказов и коэффициента простоя восстанавливаемой системы [18], получена зависимость интенсивности обработки запросов передачи данных узлом следующего перехода:

$$\mu_{зпд} = \frac{1}{T_{ппд} + T_{пд}}, \quad (3.5.2)$$

где  $T_{ппд}$  – длительность процедуры подготовки передачи данных (2.4.10);  $T_{пд}$  – времени передачи блока данных (3.5.1).

Надежность узла определяется коэффициентом его готовности к обработке поступающих запросов передачи данных [18, 107] для установившегося режима:

$$F_{усп} = \frac{\mu_{зпд}}{\mu_{зпд} + w_{зпд}}, \quad (3.5.3)$$

где  $w_{зпд}$  – интенсивность поступления запросов передачи данных;  $\mu_{зпд}$  – интенсивности обработки запросов передачи данных (3.5.2). При обработке запроса передачи данных узел находится в занятом состоянии. По окончании обработки запроса узел готов к приему следующих запросов. Из этого следует, что:

$$\mu_{усп} \equiv \mu_{зпд} \quad (3.5.4)$$

Для выполнения математического моделирования надежности узла следующего перехода приняты следующие исходные данные, соответствующие каналному уровню коммуникационной системы с радиодоступом [14]:

- $T_{кд} = 4626.67\text{мс}$  – длительность передачи кадра данных (приложение А.6);
- $T_{ку.спд} = 1306.67\text{мс}$  – длительность передачи управляющего кадра (приложение А.3);
- $T_{мми} = 201\text{мс}$  – величина минимального межкадрового интервала (2.4.1.2);
- $w_{зпд} = (0.01 \div 0.9)$  – интенсивность поступления запросов передачи данных, количество измерений равно – 20;
- $n = 1, 2, 4$  – количество кадров, использованных для передачи блока данных;
- $r = 4$  – допустимое количество повторных попыток передачи кадров данных;
- $Q_{пк} = (0.0227, 0.1585, 0.5, 0.8234, 0.982)$  – вероятность потери кадра в результате действия помехи (приложение Б.4).

Полученные в результате моделирования, зависимости коэффициента готовности узла следующего перехода от интенсивности поступления запросов передачи данных и вероятности потери кадров данных в результате действия помех  $Q_{пк}$  представлены на рисунке 3.5.1. Численные результаты математического моделирования приведены в таблицах Б.4.1, Б.4.2 (приложение Б.4).

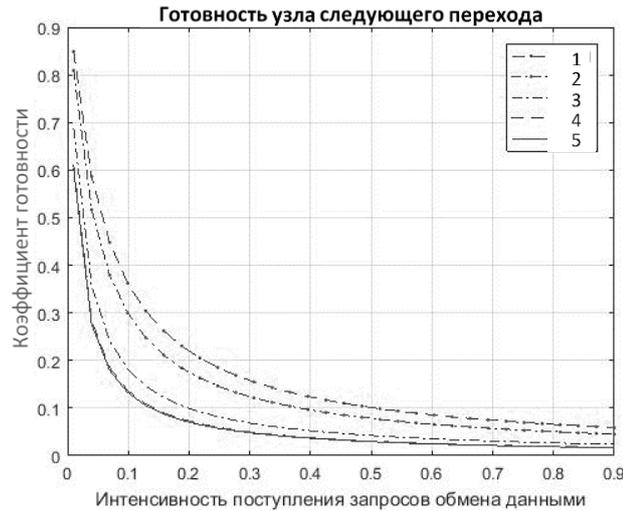


Рисунок 3.5.1 Коэффициент готовности узла следующего перехода;  $n = 2$  – количество кадров, использованных для передачи блока данных;  $Q_{пк}$  – вероятность неудачной попытки передачи кадра данных  $Q_{пк}$ : 1) 0.0227; 2) 0.1585; 3) 0.5; 4) 0.8234; 5) 0.982

Анализ полученных зависимостей показывает, что рост интенсивности поступления запросов обмена данными  $w_{зпд}$  приводит к увеличению времени, нахождения узла в состоянии восстановления, что снижает готовность узла следующего перехода к обработке поступающих запросов передачи данных [18, 107]. Так, при постоянных значениях показателей  $p_{ош.} = 10^{-4}$  и  $n = 2$  коэффициент готовности узла составил (приложение Б.4 таблице Б.4.1):

- $F_{усп} = 0.8091$  при  $w_{зпд} = 0.01$ ;
- $F_{усп} = 0,059$  при  $w_{зпд} = 0.9$ .

На величину коэффициента готовности узла также оказывают влияние величина вероятности ошибки элемента принимаемого сигнала и размер передаваемого блока данных. Так, при постоянных значениях показателей  $w_{зпд} = 0.02$ , и  $n = 1$  коэффициент готовности узла составил (приложение Б.4 таблице Б.4.1):

- $F_{усп} = 0,9025$  при  $p_{ош.} = 10^{-5}$ ;
- $F_{усп} = 0,0508$  при  $p_{ош.} = 10^{-1}$ .

В результате моделирования готовности узла следующего перехода получены зависимости коэффициента готовности от интенсивности поступления запросов обмена данными, качества физической среды и размеров передаваемых блоков данных.

Рост интенсивности запросов передачи данных приводит к снижению коэффициента узла готовности. Тогда, для поддержания заданного уровня надежности узла следующего перехода следует использовать адаптивные методы управления потоками данных, выполняющими перераспределение потоковой нагрузки на альтернативные линии передачи данных. Снижение качества физической среды также приводит к уменьшению готовности узла

следующего перехода. Для обеспечения требуемого уровня надежности передачи данных необходимо применение методов резервирования физических каналов передачи данных.

Таким образом, синтезированы параметры надежности узла следующего перехода: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показывает, что готовность узла к обработке запросов передачи данных зависит от интенсивности поступления запросов, надежности трасс установления соединения и передачи данных, размера блока передаваемых данных, алгоритма обмена данными. Рост интенсивности запросов передачи данных приводит к снижению коэффициента готовности узла. Так, коэффициент готовности узла составил  $F_{усп} = 0.81$  и  $F_{усп} = 0,06$  при интенсивности запросов передачи данных  $w_{зпд} = 0.01$  и  $w_{зпд} = 0.9$  соответственно. Следовательно, управление потоками данных позволяет изменять показатель коэффициента готовности узла следующего перехода.

### **3.6. Структурно-параметрический синтез трассы передачи данных в пространстве параметров надежности**

При успешном выполнении этапов установления соединения (разделы 2.3, 3.4) и запроса готовности узла следующего перехода (раздел 3.5) соседние узлы переходят к этапу передачи данных. Для этого на основе каналов  $E_{пд}$  и заданного алгоритма обмена данными формируется среда передачи данных.

Анализ полученных результатов надежности физических каналов (раздел 3.3) показывает, что для обеспечения требуемого уровня надежности обмена данными необходимо использование методов повышения надежности. Использование отдельных каналов  $e_{пд,i} \in E_{пд}$  для передачи данных потенциально ограничивает длительность периода исправного состояния линии передачи данных величиной периода квазистационарности  $T_{кск}$  физического канала. Из этого следует, что для применения проактивных методов маршрутизации следует выполнить ряд мер, нацеленных на увеличение надежность линий передачи данных.

В ходе взаимодействия в среде установления соединения каждый узел формирует оценки надежности физических каналов  $e_{пд,i} \in E_{пд}$  на период времени  $[t_i, t_i + T_{оос}]$  (раздел 3.3). Полученные оценки позволяют определить для каждого отношения соседства множество каналов передачи данных, обладающих наилучшими показателями надежности и использовать их для формирования среды передачи данных.

Каналы с наилучшими (удовлетворительными) показателями качества формируют интерфейсы узлов. Отобранные для формирования интерфейса каналы  $e_{и,i} \in E_{и} \in E_{пд}$

сортируются в порядке убывания  $P_{\text{ИСК.ПД.}i}$ . Формирование интерфейса, его состав и надежность определяются узлами в ходе выполнения процедуры обновления отношений соседства с периодом  $T_{\text{ООС}}$ . Интерфейс представляет собой восстанавливаемую систему с резервированием методом замещения.

Основываясь на принятом алгоритме передачи данных, для организации двустороннего взаимодействия соседние узлы используют интерфейсы, образуя на время обмена полезными данными трассу передачи данных. Трасса передачи данных представляет собой восстанавливаемую систему с основным соединением элементов.

### 3.6.1. Разработка модели надежности интерфейса узла

В соответствии с принятой базовой структурой (раздел 3.2) линия передачи данных обеспечивает обмена данными между соседними узлами средствами трассы передачи данных. Основу трассы передачи данных составляют физические каналы  $E_{\text{ПД}}$  (раздел 2.1) с нестационарными параметрами качества передаваемых сигналов. Тогда, трасса передачи данных должна сформироваться как система, надежность которой превышает надежность отдельных физических каналов  $\{e_{\text{ПД.}i}\} \in E_{\text{ПД}}$ .

В результате применения метода оценки надежности (раздел 3.3) каждым узлом для каждого отношения соседства получены прогнозируемые на период времени  $[t_i, t_i + T_{\text{ООС}}]$  вероятности исправного состояния  $P_{\text{ИСК.}i}$  (3.3.4), интенсивности отказов и восстановлений  $\{\lambda_{e_{\text{УС.}i}}, \mu_{e_{\text{УС.}i}}\}$  (3.3.5, 3.3.7, 3.3.8) каналов  $\{e_{\text{УС.}i}\} \in E_{\text{УС}}$ . Исходя из условий использования ресурса физических каналов (раздел 2.1), оценки надежности каналов  $\{e_{\text{УС.}i}\} \in E_{\text{УС}}$  проецируются на соответствующие каналы передачи данных  $\{e_{\text{ПД.}i}\} \in E_{\text{ПД}}$ :  $\lambda_{e_{\text{ПД.}i}} = \lambda_{e_{\text{УС.}i}}$ ;  $\mu_{e_{\text{ПД.}i}} = \mu_{e_{\text{УС.}i}}$ .

Пусть для каждого отношения соседства каждым узлом определяется набор каналов  $\{e_{\text{ПД.}i}\} \in E_{\text{ПД}}$ , для которых  $\{P_{\text{ИСК.}i}\} \geq P_{\text{ИСК.доп}}$ , где  $P_{\text{ИСК.доп}}$  – допустимая вероятность исправного состояния канала. Положим, что количество и состав каналов  $\{e_{\text{ПД.}i}\} \in E_{\text{ПД}}$ , определенных каждой стороной отношений соседства будут различаться. Тогда, обмен данными осуществляется по двум симплексным каналам  $(e_{\text{ПД.}i}, e_{\text{ПД.}j}) \in E_{\text{ПД}}$ , каждый из которых формирует физическую среду передачи данных.

В соответствии с принятым протоколом передачи данных (раздел 2.4) узлы выполняют асинхронный доступ к среде передачи данных и квитируемый обмен блоками данных фиксированных форматов (приложения А.3, А.6) при допустимом количестве повторных попыток передачи кадра данных  $r$ . Каждая попытка передачи кадра выполняется в среде

передачи данных. В случае превышения количества повторных попыток узел определяет отказ среды. Тогда, процесс передачи данных в канале  $e_{пд,i} \in E_{пд}$ , в соответствии с алгоритмом передачи данных (раздел 2.4.2), моделируется восстанавливаемой системой с резервированием замещением [104, 114]. На рисунке 3.6.1.1 показана структурная схема канала передачи данных  $e_{пд,i} \in E_{пд}$ .

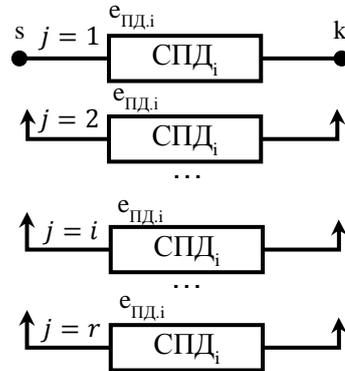


Рисунок 3.6.1.1 Структурная схема канала передачи данных; СПД<sub>i</sub> – i-я среда передачи данных, образованная каналом  $e_{пд,i} \in E_{пд}$ ; {s, k} – соседние узлы; r – количество попыток передачи кадра данных

Каждая последующая попытка передачи моделируется замещающим элементом системы (СПД<sub>i</sub>) (рисунок 3.6.1.1). Поскольку все попытки выполняются в одном физическом канале  $e_{пд,i} \in E_{пд}$ , то позволительно допустить, что интенсивности отказов и восстановлений всех элементов системы соответственно равны.

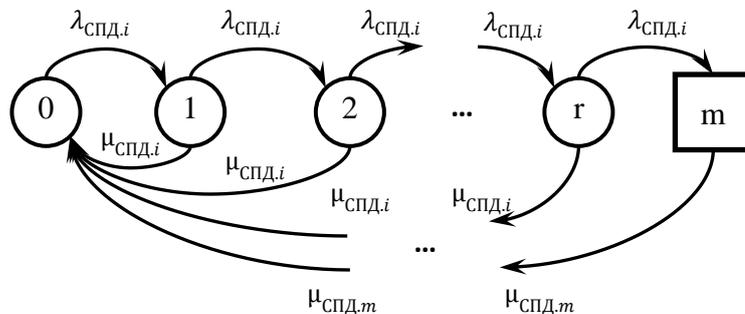


Рисунок 3.6.1.2 Граф состояний канала передачи данных  $e_{пд,i} \in E_{пд}$ ; r – допустимое количество попытках передачи кадра данных; {0, 1, ..., r, m} – состояния системы;  $\lambda_{спд,i}, \mu_{спд,i}$  – интенсивности отказов и восстановлений СПД<sub>i,sk</sub>

Состояния системы – среда передачи данных при попытке передачи кадра данных в канале  $e_{пд,i} \in E_{пд}$  показано вершинами графа (3.6.1.2):

- 0: система находится в исправном состоянии, передача кадров данных выполняется без потерь;
- 1, 2, ..., r: система находится в исправном состоянии; последовательно выполнены  $i = 1, 2, \dots, r$  неудачные попытки передачи кадров данных, где  $\lambda_{спд,i}$  – интенсивность

возникновения отказов среды;  $\mu_{\text{СПД},i}$  – интенсивность восстановления среды; при выполнении удачной повторной попытки передачи кадра данных система возвращается в состояние 0;

- $m = r + 1$ : исчерпаны все попытки передачи кадра данных, система находится в состоянии восстановления.

Исходя из вышесказанного, состояние канала  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  при попытке передачи кадра данных определяется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -\lambda_{\text{СПД},i}p_0(t) + \mu_{\text{СПД},i}(p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_r(t)) + \mu_{\text{СПД},m}p_m(t) \\ p'_1(t) = -(\lambda_{\text{СПД},i} + \mu_{\text{СПД},i})p_1(t) + \lambda_{\text{СПД},i}p_0(t) \\ p'_2(t) = -(\lambda_{\text{СПД},i} + \mu_{\text{СПД},i})p_2(t) + \lambda_{\text{СПД},i}p_1(t) \\ \dots \\ p'_r(t) = -(\lambda_{\text{СПД},i} + \mu_{\text{СПД},i})p_r(t) + \lambda_{\text{СПД},i}p_{r-1}(t) \\ p'_m(t) = -\mu_{\text{СПД},m}p_m(t) + \lambda_{\text{СПД},i}p_r(t) \end{cases}, \quad (3.6.1.1)$$

где  $\sum_{i=0}^m p_i(t) = 1$ . Решением системы (3.6.1.1) являются выражения для стационарных вероятностей  $p(t)$ . Для стационарного режима (при  $t \rightarrow \infty$ ) вероятность нахождения канал  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  в состоянии отказа определяется выражением:

$$p_m = \frac{\lambda_{\text{СПД},i}^m}{\lambda_{\text{СПД},i}^m + \mu_{\text{СПД},m} \sum_{j=1}^r \left[ \frac{(r+1)!}{j!(r+1-j)!} * \lambda_{\text{СПД},i}^{(m-j)} * \mu_{\text{СПД},i}^{(j-1)} \right] + \mu_{\text{СПД},i}^r \mu_{\text{СПД},m}}, \quad (3.6.1.2)$$

где  $m = r + 1$ .

Пусть для выполнения математического моделирования и сокращения расчетов интенсивность восстановления системы в состоянии  $m$  равна  $\mu_{\text{СПД},m} = \mu_{\text{СПД},i}$ . Тогда, (3.6.1.2) принимает следующий вид [18]:

$$p_m = \frac{\lambda_{\text{СПД},i}^m}{(\lambda_{\text{СПД},i} + \mu_{\text{СПД},i})^m}. \quad (3.6.1.3)$$

Следовательно, вероятность нахождения системы  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  в исправном состоянии определяется равенством:

$$P_{\text{ИСК.ПД},i} = 1 - p_m. \quad (3.6.1.4)$$

Полученная вероятность является коэффициентом его готовности:

$$F_{e_{\text{ПД},i}} \equiv P_{\text{ИСК.ПД},i}. \quad (3.6.1.5)$$

Пусть распределение времени до возникновения отказов и восстановлений канала  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  соответствует экспоненциальному закону. Тогда, время восстановления канала  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$ , как восстанавливаемой системы с резервированием замещением определяется выражением [18]:

$$T_{e_{\text{ПД},i},\text{в}} = \frac{1}{m * \mu_{\text{СПД},i}}. \quad (3.6.1.6)$$

На основе (3.6.1.6) получена зависимость интенсивности восстановления канала  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$ :

$$\mu_{e_{\text{ПД},i}} = \frac{1}{T_{e_{\text{ПД},i.в}}}. \quad (3.6.1.7)$$

Среднее время наработки на отказ восстанавливаемой системы с резервированием замещением равно [18]:

$$T_{e_{\text{ПД},i}} = \frac{F_{e_{\text{ПД},i}}}{(1 - F_{e_{\text{ПД},i}})} * T_{e_{\text{ПД},i.в}}. \quad (3.6.1.8)$$

Подставляя в выражение (3.6.1.8) выражения (3.6.1.3 – 3.6.1.6), получена зависимость интенсивности отказов канала  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  при  $m = r + 1$ , где  $r$  – допустимое количество попыток передачи данных:

$$\lambda_{e_{\text{ПД},i}} = \frac{1}{T_{e_{\text{ПД},i}}} = m * \mu_{\text{СПД},i} \left( \frac{(\lambda_{\text{СПД},i} + \mu_{\text{СПД},i})^m}{\lambda_{\text{СПД},i}^m} - 1 \right). \quad (3.6.1.9)$$

Для моделирования зависимости коэффициента готовности канала передачи данных  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  использовались следующие исходные данные (таблица Б.5.1, приложение Б.5):

- $\lambda_{\text{СПД},i} = \{1.4843 - 0.015\}$  – интенсивность отказов среды передачи данных в физическом канале  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$ ;
- $\mu_{\text{СПД},i} = \{0.015 - 1.4843\}$  – интенсивность восстановления среды передачи данных в физическом канале  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$ ;
- $r = \{1, 2, 3, 4\}$  – количество попыток передачи кадра данных.

В результате моделирования получены зависимости коэффициента готовности  $F_{e_{\text{ПД},i}}$ , интенсивностей отказов  $\lambda_{e_{\text{ПД},i}}$  и восстановлений  $\mu_{e_{\text{ПД},i}}$  канала передачи данных  $e_{\text{ПД},i} \in E_{\text{ПД}}$  при различных значениях допустимого количества повторных попыток передачи кадров данных (Рисунок 3.6.1.3).

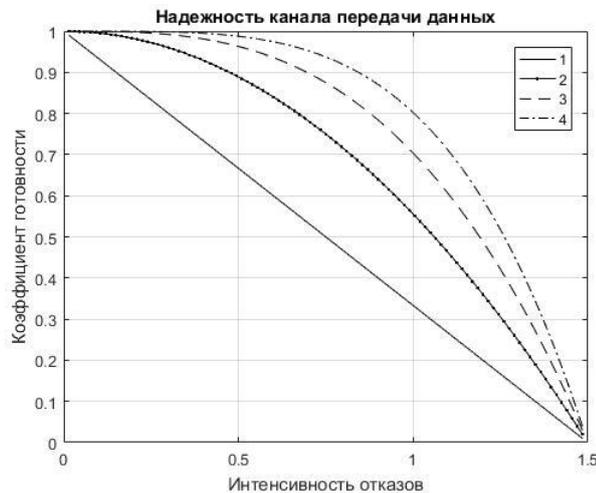


Рисунок 3.6.1.3 Коэффициент готовности канала передачи данных при допустимом количестве попыток передачи кадра данных:  $r = 1$  (1);  $r = 2$  (2);  $r = 3$  (3);  $r = 4$  (4)

В таблице Б.5.2 (приложения Б.5) приведены численные результаты математического моделирования коэффициента готовности  $F_{e_{пд.i}}$  канала передачи данных  $e_{пд.i} \in E_{пд}$ . В таблице 3.6.1.1 приведены средние значения коэффициента готовности и интенсивностей отказов и восстановлений канала при различных значениях  $r$ .

Таблица 3.6.1.1 Средние значения коэффициента готовности и интенсивностей отказов и восстановлений канала  $e_{пд.i} \in E_{пд}$  при различных значениях  $r$

Количество попыток ( $r$ )	Коэффициент готовности ( $F_{e_{пд.i}}$ )	Интенсивность отказов ( $\lambda_{e_{пд.i}}$ )	Интенсивность восстановления ( $\mu_{e_{пд.i}}$ )
1	0.5	0.7496	0.7496
2	0.6613	0.2887	2.2489
3	0.7825	0.156	2.985
4	0.803	0.098	3.748

Анализ результатов моделирования показывает, что увеличение количества попыток  $r$  приводит к росту надежности выполнения процедуры передачи данных в канале  $e_{пд.i} \in E_{пд}$  (таблица 3.6.1.1), а также к росту среднего времени транзакции передачи данных  $T_{т.пд.ср.}(r)$  (2.4.2.6). При  $r \rightarrow \infty$  система не способна определять моменты перехода в состояние отказа и выполнять передачу данных. Следовательно, количество повторных попыток определяется требованиями надежности и ограничивается временем доставки сообщений.

Величина периода наработки на отказ  $T_{e_{пд.i}}$  физического канала  $e_{пд.i} \in E_{пд}$  ограничивается длительностью периода квазистационарности  $T_{КСК}$  (2.5.3). Кроме того, фазы и длительности периодов квазистационарности параметров каналов на входах соседних узлов не совпадают, что значительно снижает вероятность успешного обмена данными.

Для увеличения надежности передачи данных между соседними узлами каналы  $e_{пд.i} \in E_{пд}$  объединяются в логическую структуру – интерфейс. Интерфейс состоит из группы каналов  $E_{и} \in E_{пд}$ , для которых выполняется условие надежности канала передачи данных:

$$P_{иск.пд.i} \geq P_{иск.пд.доп.}, \quad (3.6.1.10)$$

где  $P_{иск.пд.доп.}(p_{ош.доп.})$  – допустимая вероятность исправного состояния канала  $e_{пд.i} \in E_{пд}$  (3.3.3).

Пусть отобранные для формирования интерфейса каналы  $e_{и.i} \in E_{и} \in E_{пд}$  сортируются в порядке убывания  $P_{иск.пд.i}$ . Для выполнения передачи данных в интерфейсе определяется текущий интерфейсный канал  $e_{и} \in E_{и}$ , обладающий наибольшей вероятностью исправного

состояния  $P_{\text{иск.пд.}i}$ . Остальные каналы  $E_{\text{и}} \in E_{\text{пд}}$  составляют список вероятных интерфейсных каналов  $e_{\text{ив.}i} \in E_{\text{и}}$ . В случае отказа (или снижения качества) канала  $e_{\text{ит}} \in E_{\text{и}}$  выполняется его замена интерфейсным каналом  $e_{\text{ив.}i} \in E_{\text{и}}$  с наилучшим показателем надежности. Формирование интерфейса, его состав и надежность определяются узлами в ходе выполнения процедуры обновления отношений соседства с периодом  $T_{\text{оос}}$  (раздел 2.5). Количество и состав групп интерфейсных каналов соседних узлов могут различаться.

Тогда, интерфейс представляет собой восстанавливаемую систему с резервированием методом замещения [18], элементы которой  $e_{\text{и.}i} \in E_{\text{и}}$  независимы по отказам и неограничены по восстановлению. На рисунке 3.6.1.4 показана структурная схема интерфейса, состоящего из  $n$  элементов, где  $n$  – определяется количеством каналов  $e_{\text{пд.}i} \in E_{\text{пд}}$  соответствующих условию (3.6.1.10).

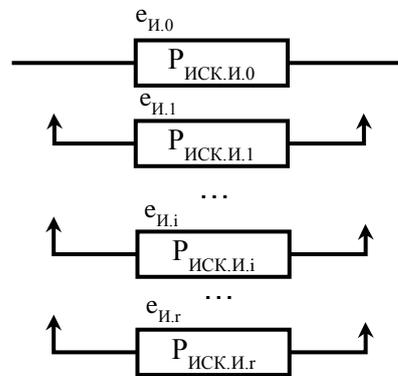


Рисунок 3.6.1.4 Структурная схема интерфейса узла;  $r$  – количество элементов системы;  $e_{\text{и.}i}$  –  $i$ -й интерфейсный канал;  $P_{\text{иск.и.}i}$  – вероятность исправного состояния канала  $e_{\text{и.}i}$

Отказ интерфейса происходит при последовательном отказе всех интерфейсных каналов  $\{e_{\text{и.}i}\} \in E_{\text{и}}$ . Поведение интерфейса при отказе и восстановлении интерфейсных каналов соответствует процессам «гибели и размножения» [99, 100]. Стационарные состояния интерфейса обозначены индексами  $0 \div m$ , где  $m = r + 1$  – состояние отказа интерфейса.

Интерфейсные каналы отсортированы в порядке убывания  $P_{\text{иск.пд.}i}$ , следовательно, каждый канала  $e_{\text{и.}i} \in E_{\text{и}}$  характеризуется собственным показателем  $\lambda_{e_{\text{и.}i}}$ . В случае отказа текущего интерфейсного канала он заменяется следующим каналом с наибольшим показателем  $P_{\text{иск.пд.}i}$  с переходом системы из состояния  $i$  в состояние  $i + 1$ . В данной модели не учитываются комбинации отказов различных каналов.

Пусть интерфейсные каналы независимы в восстановлении. Тогда, переход системы из состояния  $i$  в состояние  $i - 1$  выполняется с интенсивностью равной произведению [18]:

$$\mu_i = \prod_{j=1}^i \mu_{e_{\text{и.}j}}. \quad (3.6.1.11)$$

На рисунке 3.6.1.5 показан граф состояний интерфейса узла.

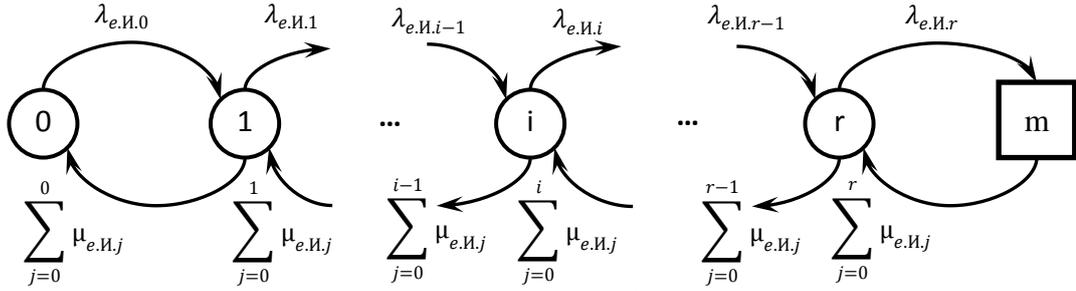


Рисунок 3.6.1.5 Граф состояний интерфейса узла;  $\lambda_{e.и.i}, \mu_{e.и.i}$  – интенсивности отказов и восстановлений канала  $e_{и.i} \in E_{и}$ ;  $r$  – количество интерфейсных каналов;  $m$  – состояние отказа

Состояния системы – интерфейс показаны вершинами графа на рисунке 3.6.1.5:

- 0: интерфейс находится в исправном состоянии и готов к передаче кадров данных;
- $i = \{1, 2, \dots, r\}$ : произошел отказ элемента  $e_{и.i-1} \in E_{и}$ ; отказавшие элементы восстанавливаются; интерфейс находится в исправном состоянии;
- $m$ : произошел последовательный отказ всех элементов системы; элементы  $\{e_{и.i}\} \in E_{и}$  – восстанавливаются; интерфейс находится в состоянии восстановления.

В соответствии с графом состояний интерфейса (рисунок 3.6.1.5) получена система дифференциальных уравнений интерфейса узла:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -\lambda_{e.и.0}p_0(t) + [\sum_{j=0}^0 \mu_{e.и.j}]p_1(t) \\ p'_1(t) = \lambda_{e.и.0}p_0(t) - (\sum_{j=0}^0 \mu_{e.и.j} + \lambda_{e.и.1})p_1(t) + [\sum_{j=0}^1 \mu_{e.и.j}]p_2(t) \\ p'_i(t) = \lambda_{e.и.i-1}p_{i-1}(t) - (\sum_{j=0}^{i-1} \mu_{e.и.j} + \lambda_{e.и.i})p_i(t) + [\sum_{j=0}^i \mu_{e.и.j}]p_{i+1}(t) \\ p'_m(t) = \lambda_{e.и.r}p_r(t) - [\sum_{j=0}^r \mu_{e.и.j}]p_m(t) \end{cases} \quad (3.6.1.12)$$

при начальных условиях:

$$p_0(0) = 1; p_i(0) = 0, \text{ где } i = \{1, 2, \dots, m\}; \sum_{i=0}^m p_i(t) = 1 \quad (3.6.1.13)$$

Решением системы уравнений (3.6.1.12) являются стационарные вероятности состояния интерфейса. Тогда, отказа интерфейса (при  $t \rightarrow \infty$ ) есть стационарная вероятность нахождения системы в состоянии  $m$ :

$$p_m(m) = \frac{\prod_{i=0}^{m-1} \lambda_{e.и.i}}{f(m)}, \quad (3.6.1.14)$$

где  $f(m) = \prod_{i=0}^{m-1} \lambda_{e.и.i} + f(m-1) * \sum_{i=0}^{m-1} \mu_{e.и.i}$ , при  $0 \leq m \leq (r+1)$ .

Таким образом, вероятность исправного состояния интерфейса равна:

$$P_{иси} = 1 - p_m. \quad (3.6.1.15)$$

Следовательно, вероятность исправного состояния интерфейса есть коэффициент его готовности:

$$F_{и} \equiv P_{иси}. \quad (3.6.1.16)$$

Пусть, восстановление интерфейса происходит при восстановлении (замене) любого из отказавших интерфейсных каналов. Тогда, время восстановления интерфейса определяется выражением:

$$T_{И.В} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{m-1} \mu_{e.и.i}}. \quad (3.6.1.17)$$

Следовательно, интенсивность восстановления интерфейса равна:

$$\mu_{И} = \frac{1}{T_{И.В}}. \quad (3.6.1.18)$$

Для определения времени наработки на отказ используется выражение, полученное в работе [18]:

$$T = \frac{F}{F_{П}} * T_{В.}, \quad (3.6.1.19)$$

где  $F$  – коэффициент готовности системы;  $F_{П}$  – коэффициент простоя системы;  $T_{В.}$  – время восстановления системы. На основе (3.6.1.19) определяется выражение для времени наработки на отказ интерфейса узла:

$$T_{И} = \frac{F_{И}}{F_{И.П}} * T_{И.В.} = \frac{1-p_m}{1-(1-p_m)} * T_{И.В.} = \frac{T_{И.В.}}{p_m} - T_{И.В.}. \quad (3.6.1.20)$$

Подставляя в (3.6.1.20) выражение (3.6.1.14, 3.6.1.17) получим выражение для вычисления времени наработки на отказ интерфейса узла:

$$T_{И} = \frac{f(m-1)}{\prod_{i=0}^{m-1} \lambda_{e.и.i}}. \quad (3.6.1.21)$$

Тогда, интенсивность возникновения отказов определяется отношением:

$$\lambda_{И} = \frac{1}{T_{И}}. \quad (3.6.1.22)$$

Для выполнения математического моделирования надежности интерфейса передачи данных узла приняты следующие диапазоны значений параметров (таблица Б.6.1, приложение Б.6):

- $n = 1, 2, 3, 4$ : количество каналов передачи данных в составе интерфейса;
- $n_{ПД} = 1$ : количество повторных попыток передачи кадра в канале;
- $\lambda_{e.и.i} = \{1.4843 - 0.015\}$  – диапазон интенсивностей отказов канала передачи данных;
- $\mu_{e.и.i} = \{0.015 - 1.4843\}$  – диапазон интенсивностей восстановлений канала передачи данных.

В результате математического моделирования получены зависимости коэффициента готовности  $F_{И}$  интерфейса от интенсивности отказов  $\lambda_{e.и}$  каналов передачи данных при различном количестве интерфейсных каналов в составе интерфейса  $n = 1, 2, 3, 4$  (рисунок 3.6.1.6).

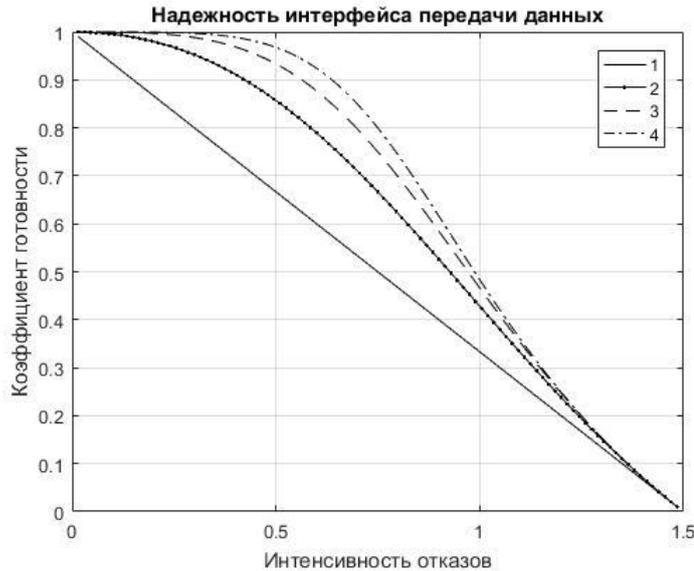


Рисунок 3.6.1.6 Зависимость коэффициента готовности интерфейса, состоящего из  $n$  каналов передачи данных, где  $n = 1(1), 2(2), 3(3), 4(4)$

Численные результаты математического моделирования: значения коэффициента готовности, интенсивности отказов и восстановлений интерфейса приведены в таблице Б.6.1 (Приложение Б.6).

Анализ полученных результатов показывает, что применение интерфейсов надежность передачи данных между соседними узлами. Так, среднее значение коэффициента готовности интерфейса составило  $F_{И} = \{0.5, 0.6056, 0.6441, 0.6622\}$  при соответствующих значения  $n = 1, 2, 3, 4$  и  $n_{ПД} = 1$  (таблица 3.6.1.2). При этом среднее значение коэффициента готовности канала передачи данных при  $n_{ПД} = 1$  равно  $F_{e.ПД} = 0.5$  (таблица 3.6.1.1).

Таблица 3.6.1.2 Средние значения коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений интерфейса при различных значениях  $n$

Количество интерфейсных каналов ( $n$ )	Коэффициент готовности ( $F_{И}$ )	Интенсивность отказов ( $\lambda_{И}$ )	Интенсивность восстановления ( $\mu_{И}$ )
1	0.5	0.4973	0.7496
2	0.6056	0.3499	1.4923
3	0.6441	0.2604	2.2489
4	0.6622	0.2082	2.9985

Для исследования зависимости коэффициента готовности интерфейса  $F_{И}$ , использовались последовательности значений вероятностей исправного состояния  $\{P_{ИСК.i}\}$  каналов передачи данных  $\{e_{ПД.i}\} \in E_{ПД}$ , полученные в ходе математического моделирования

надежности канала передачи данных (таблица Б.5.3, приложение Б.5) и соответствующие нормальному закону распределения случайной величины.

Для выполнения математического моделирования надежности интерфейса были приняты следующие исходные данные:

- $E_{\text{ПД}} = 8$ : общее количество каналов передачи данных, используемых для выбора интерфейсных каналов;
- $E_{\text{И}} = 4$ : количество каналов в составе интерфейса;
- $n_{\text{ПД}} = 1$ : допустимое количество попыток передачи кадра в физическом канале;

Результаты математического моделирования зависимости коэффициента готовности интерфейса от вероятностей исправной работы каналов передачи данных показаны на рисунке 3.6.1.7. Численные результаты математического моделирования интерфейса приведены в таблице Б.6.2 (приложение Б.6).

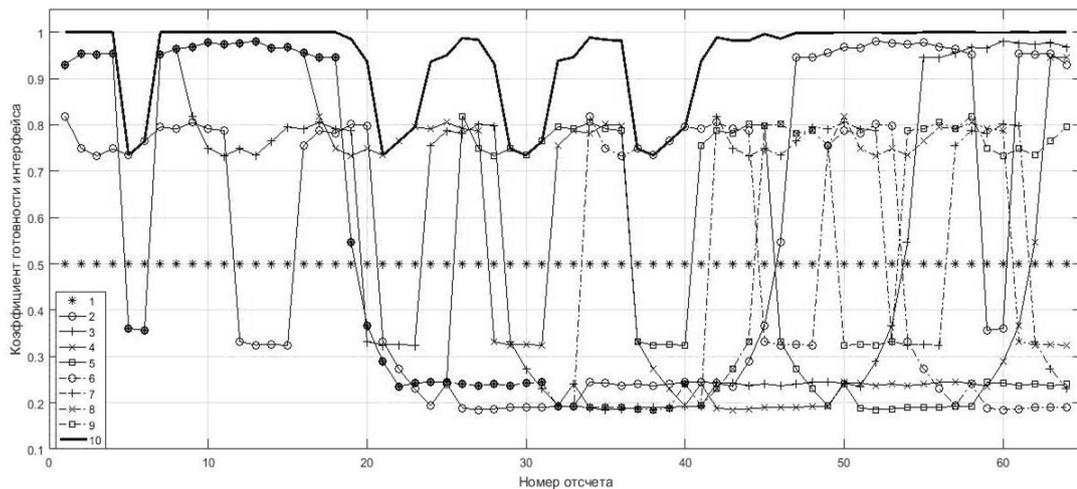


Рисунок 3.6.1.7 Коэффициент готовности интерфейса узла  $F_{\text{И}}$  (10); допустимая вероятность исправного состояния канала передачи данных  $P_{\text{ИСК.ПД.доп.}}$  (1); вероятности исправного состояния  $P_{\text{ИСК.ПД.}}$  (2 – 9) каналов  $\{e_{\text{ПД.}i}\} \in E_{\text{ПД}}$ , где  $i = (1, \dots, 8)$

Анализ полученных результатов показывает, что надежность интерфейса (рисунок 3.6.1.7, зависимость 10) превышает надежности каналов передачи данных (рисунок 3.6.1.7, зависимости 2 – 9), формирующих интерфейс, а также превышает уровень  $P_{\text{ИСК.ПД.доп.}}$  (рисунок 3.6.1.6, зависимость 1) на всем интервале моделирования. Так, в момент времени  $t = 20$  вероятности исправной работы каналов передачи данных с номерами (2, 4, 5, 6, 7, 8) не удовлетворяют условию надежности (3.6.1.10):

- $P_{\text{ИСК.ПД.2}} = 0,3318$ ;
- $P_{\text{ИСК.ПД.4}} = P_{\text{ИСК.ПД.5}} = P_{\text{ИСК.ПД.6}} = P_{\text{ИСК.ПД.7}} = P_{\text{ИСК.ПД.8}} = 0,3671$ .

При этом в момент времени  $t = 20$  коэффициент готовности интерфейса составил  $F_{И} = 0.9366$  (рисунок 3.6.1.7, приложение Б.6 таблица Б.6.2), что обеспечивается каналами (1, 3), удовлетворяющих условию надежности (3.6.1.10):

- $P_{\text{ИСК.ПД.1}} = 0,7986$ ;
- $P_{\text{ИСК.ПД.3}} = 0,7483$ .

Средние значения:

- вероятностей исправного состояния каналов передачи данных  $P_{\text{ИСК.ПД.}i} = 0.566$  при  $\sigma_{\text{ИСК.ПД.}i} = 0.317$ ;
- коэффициента готовности интерфейса составило  $F_{И} = 0.945$  при  $\sigma_{И} = 0.094$ .

На основе разработанной модели надежности получены зависимости коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений интерфейса узла от надежности, составляющих интерфейс, сред передачи данных и каналов передачи данных. Полученная в момент времени  $t_i$  оценка надежности интерфейса является прогнозируемой и стационарной с постоянными статистическими параметрами на следующий период обновления отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{00С}]$ . Оценка надежности интерфейса есть вероятность успешного приема кадров данных, передаваемых соседним узлом.

Анализ результатов выполненного математического моделирования показывает, что интерфейс обеспечивает надежность приема данных значительно превышающую надежность отдельных физических каналов. Период квазистационарности интерфейса также значительно превышает период квазистационарности отдельного физического канала.

Полученные зависимости интенсивностей отказов и восстановлений интерфейса являются компонентами оценки надежности линии передачи данных.

### 3.6.2. Разработка модели надежности трассы передачи данных

В соответствии с принятой моделью (раздел 3.2) для оценки надежности линии передачи данных требуется определить показатели надежности трассы передачи данных. В ходе взаимодействия (раздел 3.6.1) каждый узел для каждого отношения соседства формирует интерфейс и определяет показатели его надежности:

- коэффициент готовности  $F_{И}$  (3.6.1.16),
- интенсивности отказов  $\lambda_{И}$  (3.6.1.22) и восстановлений  $\mu_{И}$  (3.6.1.18).

Основываясь на принятом протоколе передачи данных (раздел 2.4.2), для организации двустороннего взаимодействия соседние узлы (s, k) используют интерфейсы  $\{I_s, I_k\}$ , образуя на время обмена полезными данными трассу передачи данных. Отказ трассы передачи данных

наступает, в результате события, при котором хотя бы один интерфейс  $\{I_s, I_k\}$  переходит в состояние восстановления. На рисунке 3.6.2.1 представлена структурная схема трассы передачи данных, образованная парой интерфейсов  $\{I_s, I_k\}$  соседних узлов.

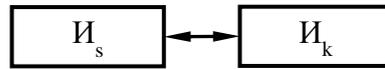


Рисунок 3.6.2.1 Схема трассы передачи данных;  $(I_s, I_k)$  – интерфейсы соседних узлов  $(s, k)$

Тогда, трасса передачи данных представляет собой восстанавливаемую систему с основным соединением элементов, в которой элементы системы независимы по отказам и не ограничены по восстановлению [18]. На рисунке 3.6.2.2 представлен граф состояний трассы передачи данных.

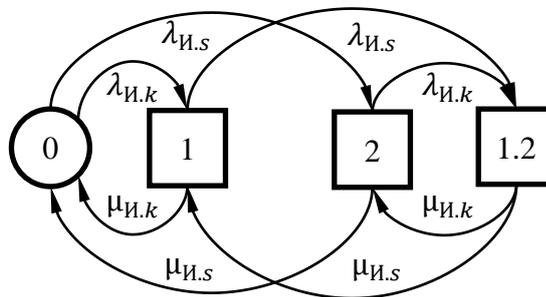


Рисунок 3.6.2.2 Граф состояний трассы передачи данных; интенсивности отказов  $\lambda_{И.с}$ ,  $\lambda_{И.к}$  и восстановлений  $\mu_{И.с}$ ,  $\mu_{И.к}$  интерфейсов узлов  $(s, k)$ ;  $\{0; 1; 2; 1.2\}$  – состояния трассы передачи данных

Состояния системы – трасса передачи данных узлов  $\{s, k\}$  показано вершинами графа на рисунке 3.6.2.2:

- 0: трасса передачи данных находится в исправном состоянии и успешно передает кадры данных;
- 1: произошел отказ элемента  $I_k$ ; элемент  $I_s$  находится в исправном состоянии и ожидает восстановления  $I_k$ ; трасса передачи данных находится в состоянии восстановления;
- 2: произошел отказ элемента  $I_s$ ; элемент  $I_k$  находится в исправном состоянии и ожидает восстановления  $I_s$ ; трасса передачи данных находится в состоянии восстановления;
- 1.2: произошел отказ элементов  $\{I_s, I_k\}$ ; трасса передачи данных находится в состоянии восстановления.

Пусть отказы интерфейсов  $\{I_s, I_k\}$  происходят с интенсивностями  $\{\lambda_{И.с}, \lambda_{И.к}\}$  соответственно. Интенсивности восстановления интерфейсов  $\{I_s, I_k\}$ , соответственно равны  $\mu_{И.с}$  и  $\mu_{И.к}$ . Тогда, в соответствии с графом состояний (рисунок 3.6.2.2) получена система дифференциальных уравнений состояний трассы передачи данных:

$$\begin{cases} p_0'(t) = -(\lambda_{и.к} + \lambda_{и.с})p_0(t) + \mu_{и.к}p_1(t) + \mu_{и.с}p_2(t) \\ p_1'(t) = \lambda_{и.к}p_0(t) - (\mu_{и.к} + \lambda_{и.с})p_1(t) + \mu_{и.с}p_{1.2}(t) \\ p_2'(t) = \lambda_{и.с}p_0(t) - (\mu_{и.с} + \lambda_{и.к})p_2(t) + \mu_{и.к}p_{1.2}(t) \\ p_{1.2}'(t) = \lambda_{и.с}p_1(t) + \lambda_{и.к}p_2(t) - (\mu_{и.к} + \mu_{и.с})p_{1.2}(t) \end{cases} \quad (3.6.2.1)$$

Для любого момента времени  $t$ :

$$p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_{1.2}(t) = 1. \quad (3.6.2.2)$$

Решение системы уравнений (3.6.2.1) выполняем при начальных условиях:

$$p_0(0) = 1; p_1(0) = p_2(0) = p_{1.2}(0) = 0. \quad (3.6.2.3)$$

В результате решения системы уравнений (3.6.2.1) получено выражение стационарной вероятности нахождения системы в исправном состоянии при  $t \rightarrow \infty$ :

$$p_0 = \frac{\mu_{и.к}\mu_{и.с}}{(\lambda_{и.к} + \mu_{и.к})(\lambda_{и.с} + \mu_{и.с})}. \quad (3.6.2.4)$$

Таким образом, стационарная вероятность исправного состояния трассы передачи данных есть коэффициент её готовности:

$$F_{\text{ТПД}} \equiv p_0. \quad (3.6.2.5)$$

Для определения надежности линии передачи данных требуется вычислить интенсивности отказов и восстановлений. Среднее время наработки на отказ восстанавливаемой системы – трасса передачи данных с основным соединением элементов не зависит от интенсивности восстановления [18] и определяется следующим выражением:

$$T_{\text{ТПД}} = \frac{1}{\lambda_{и.с} + \lambda_{и.к}}. \quad (3.6.2.6)$$

Среднее время восстановления системы – трасса передачи данных с основным соединением элементов определяется следующим выражением [18]:

$$T_{\text{ТПД,в}} = \frac{T_{\text{ТПД}}(1 - F_{\text{ТПД}})}{F_{\text{ТПД}}}, \quad (3.6.2.7)$$

Тогда, интенсивность восстановления трассы передачи данных равна:

$$\mu_{\text{ТПД}} = \frac{1}{T_{\text{ТПД,в}}}. \quad (3.6.2.8)$$

Интенсивность отказов системы – трасса передачи данных с основным соединением элементов определяется суммой интенсивностей отказов элементов системы:

$$\lambda_{\text{ТПД}} = \lambda_{и.с} + \lambda_{и.к}. \quad (3.6.2.9)$$

Полученные выражения интенсивности восстановления и отказов, а также коэффициента готовности трассы передачи данных позволяют выполнить оценку надежности линии передачи данных соседних узлов.

Для выполнения математического моделирования надежности трассы передачи данных были установлены следующие условия и приняты следующие исходные данные (таблица Б.7.1, приложение Б.7):

- показатели надежности интерфейсов  $\{I_s, I_k\}$  идентичны;
- $n = 1, 2, 3, 4$ : количество каналов передачи данных в составе каждого интерфейса;
- $r = 1$ : количество повторных попыток передачи кадра в канале;
- $\lambda_{e.и.i} = \{1.4843 - 0.015\}$  – интенсивность отказов интерфейсных каналов;
- $\mu_{e.и.i} = \{0.015 - 1.4843\}$  – интенсивность восстановления интерфейсных каналов.

В результате математического моделирования получены зависимости коэффициента готовности трассы передачи данных от интенсивности отказов интерфейсов узлов (рисунок 3.6.2.3).

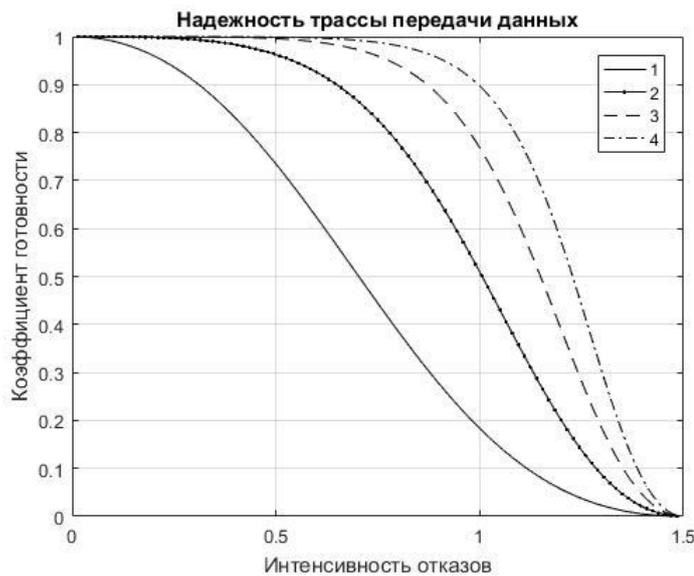


Рисунок 3.6.2.3 Коэффициент готовности трассы передачи данных, состоящей из  $n$  каналов передачи данных, где  $n = 1, 2, 3, 4$

Численные результаты математического моделирования: значения коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений трассы передачи данных при различном количестве  $n = 1, 2, 3, 4$  интерфейсных каналов в составах интерфейсов узлов приведены в таблице Б.7.2 (Приложение Б.7).

Анализ полученных результатов показывает, что надежность трассы передачи данных не превышает надежности составляющих её интерфейсов, но превышает надежность отдельных каналов передачи данных при  $n \geq 2$ .

Так, в результате моделирования получены средние значения:

- коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{ТПД} = \{0.4725, 0.6572, 0.7535, 0.8068\}$  при количестве каналов передачи данных в составе каждого интерфейса  $n = 1, 2, 3, 4$  соответственно (таблица 3.6.2.1);

- коэффициента готовности интерфейса узла  $F_{И} = \{0.5, 0.6056, 0.6441, 0.6622\}$  при количестве каналов передачи данных в составе каждого интерфейса  $n = 1, 2, 3, 4$  соответственно и  $n_{ПД} = 1$  (таблица 3.6.1.2);
- коэффициента готовности канала передачи данных при  $n_{ПД} = 1$  равно  $F_{е.ПД} = 0.5$  (таблица 3.6.1.1).

Таблица 3.6.2.1 Коэффициент готовности, интенсивностей отказов и восстановлений трассы передачи данных при различных значениях  $n$

Количество интерфейсных каналов ( $n$ )	Коэффициент готовности ( $F_{ТПД}$ )	Интенсивность отказов ( $\lambda_{ТПД}$ )	Интенсивность восстановления ( $\mu_{ТПД}$ )
1	0.4725	0.9945	0.6424
2	0.6572	0.6999	1.4102
3	0.7535	0.5208	2.1791
4	0.8068	0.4164	2.9406

Для исследования зависимости коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{ТПД}$ , использовались последовательности значений коэффициентов готовности интерфейсов  $\{F_{И.i}\}$ , полученные в ходе математического моделирования (таблица Б.6.2, приложение Б.6), соответствующие нормальному закону распределения случайной величины. В результате моделирования получены зависимости коэффициента готовности трассы передачи данных (рисунок 3.6.2.4). Численные результаты моделирования приведены в таблице Б.7.3 (приложение Б.7).



Рисунок 3.6.2.4 Изменения коэффициента готовности трассы передачи данных

Анализ полученных результатов показывает, что надежность трассы передачи данных превышает надежности каналов передачи данных, входящих в состав интерфейсов. Так, в

результате моделирования получено среднее значение коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД}} = 0.909$  при стандартном отклонении равном  $\sigma_{\text{ТПД}} = 0.0924$ . Тогда как, средние значения вероятностей исправного состояния каналов передачи данных, составляющих интерфейс, равны  $P_{\text{ИСК},i} = 0.566$  при стандартном отклонении  $\sigma_{\text{ИСК},i} = 0.317$ .

На основе разработанной модели надежности получены зависимости коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений трассы передачи данных. Полученная в момент времени  $t_i$  оценка надежности трассы передачи данных является прогнозируемой и стационарной с постоянными статистическими параметрами. Оценка надежности трассы передачи данных есть вероятность её исправного состояния на следующий период обновления отношений соседства  $[t_i, t_i + T_{\text{ООС}}]$ .

Анализ результатов математического моделирования показывает, что трасса передачи данных обеспечивает надежность обмена данными превышающую надежность отдельных физических каналов. Период квазистационарности трассы передачи данных также значительно превышает период квазистационарности отдельного физического канала.

Таким образом, в результате структурного синтеза в соответствии с принятыми алгоритмами обмена данными получена структура канала передачи данных, который является элементом системы – интерфейс узла. Канал передачи данных есть восстанавливаемая система с резервированием замещением. В результате параметрического синтеза на получены параметры надежности каналов передачи данных: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показал, что надежность канала передачи данных зависит от качества физического канала и количества допустимых попыток передачи кадра данных. Рост количества допустимых попыток передачи приводит к росту задержки определения отказа канала. Надежность канала не является достаточной для обеспечения обмена полезными данными в случае возникновения длительных замираний передаваемого сигнала. Следовательно, для повышения надежности обмена данными необходимо агрегирование элементов – каналы передачи данных в резервированную систему. В результате структурно параметрического синтеза интерфейса разработаны и синтезированы: модель надежности интерфейса узла, где интерфейс есть восстанавливаемая система с резервированием методом замещения, состоящая из каналов передачи данных; параметры интерфейса: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ полученных результатов математического моделирования показал, что надежность интерфейса превышает надежности каналов передачи данных. Так, среднее значение коэффициента готовности интерфейса составило  $\overline{F}_{\text{И}} = 0.95$  ( $\sigma_{\text{И}} = 0.09$ ). Тогда как, среднее значение коэффициента готовности канала передачи данных получено равным  $\overline{F}_{\text{е.ПД}} = (0.5; 0.66; 0.78; 0.8)$  при соответствующем

количестве попыток передачи кадра данных ( $r = 1, 2, 3, 4$ ). Интерфейсы узлов являются элементами трасс передачи данных. В результате структурно параметрического синтеза трассы передачи данных разработаны и синтезированы: структура и модель надежности трассы передачи данных, как восстанавливаемой системы с последовательным соединением элементов – интерфейсов узлов; параметры надежности трассы установления соединения: интенсивности отказов и восстановлений. В результате моделирования получено среднее значение коэффициента готовности трассы передачи данных составило  $\overline{F_{\text{ТПД}}} = 0.91$  ( $\sigma_{\text{ТПД}} = 0.09$ ).

### 3.7. Структурно-параметрический синтез линии передачи данных в пространстве параметров надежности

В разделах 3.4, 3.5 и 3.6 получены элементы, составляющие линию передачи данных в соответствии с принятой структурой (раздел 3.3):

- трассы установления соединения,
- узла следующего перехода,
- трассы передачи данных.

Для каждого элемента получены выражения коэффициентов готовности, интенсивностей отказов и восстановлений [104]. Разработанные модели и методы позволяют определить прогнозируемую на следующий период  $T_{\text{ООС}}$  стационарную оценку надежности линии передачи данных.

Таким образом, получена структура линии передачи данных, показанная на рисунке 3.7.1.

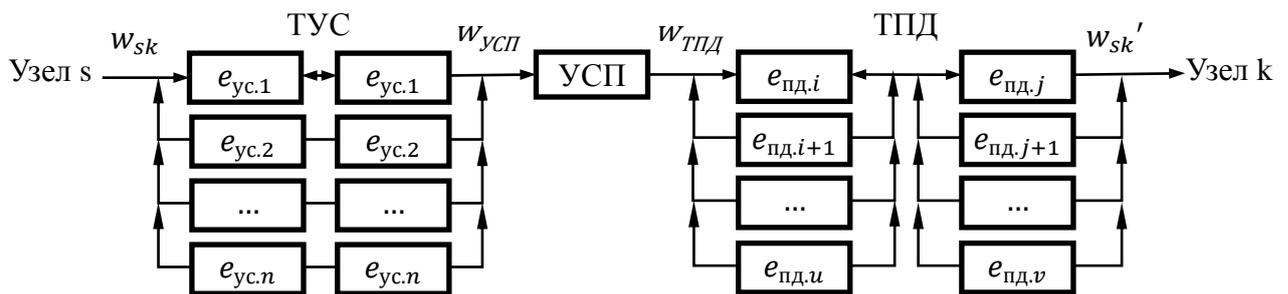


Рисунок 3.7.1 Структурная схема линии передачи данных соседних узлов  $\{s, k\}$ ; ТУС – трасса установления соединения; УСП – узел следующего перехода; ТПД – трасса передачи данных;  $e_{yc}$  – физический канала установления соединения;  $e_{пд}$  – физический канала передачи данных;  $w_{sk}$  – интенсивность потока данных от узла s до узла k;  $w_{ycп}$  – интенсивность потока запросов готовности узла следующего перехода;  $w_{тпд}$  – интенсивность потока обращений к трассе передачи данных

В соответствии с принятыми алгоритмами (разделы 2.3, 2.4) передача данных между соседними узлами выполняется в ходе последовательного действия элементов линии передачи

данных. Тогда, линия передачи данных представляет собой восстанавливаемую систему с основным соединением независимых по отказам и неограниченных в восстановлении элементов. Оценка надежности является прогнозируемой стационарной на интервале времени  $[t_i, t_i + T_{00c}]$  с экспоненциальным распределением времени до возникновения отказов и восстановлений элементов.

Линия передачи данных может находиться в пассивном и активном состоянии. При формировании маршрутов используется прогнозируемая надежность линий, определенная в пассивном состоянии. Отказ линии есть отказ любого из её элементов. Граф состояний системы – линия передачи данных  $l_{sk}$  показан на рисунке 3.7.2.

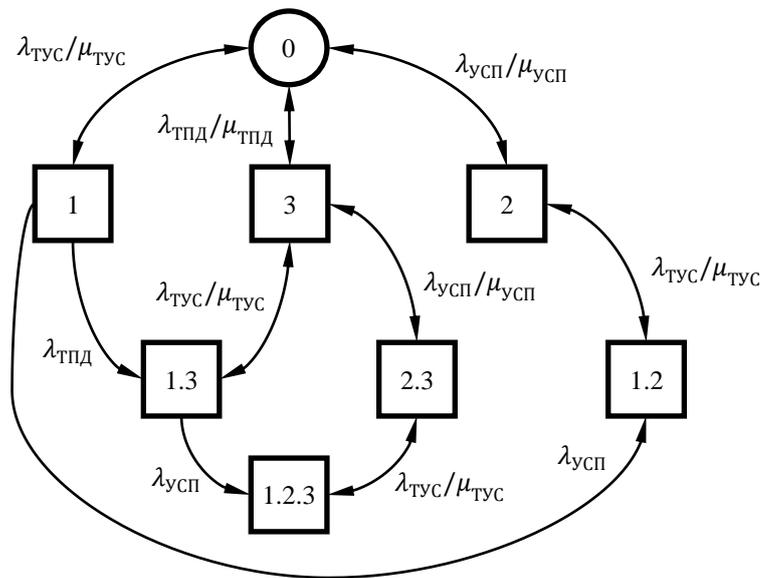


Рисунок 3.7.2 Граф состояний системы – линия передачи данных;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента;  $\mu_i$  – интенсивность восстановления  $i$ -го элемента, где  $i = \{TUC, USP, TPD\}$

Состояние системы – линия передачи данных ( $l_{sk}$ ) между узлами  $\{s, k\}$  показано вершинами графа на рисунке 3.7.1:

- состояние 0:  $l_{sk}$  – исправна; элементы: TUC, USP и TPD исправны и ожидают выполнения процедур обмена данными или функционируют, непосредственно выполняя обмен данными;
- состояние 1: элемент TUC восстанавливается после отказа; элементы USP и TPD исправны и ожидают восстановления TUC или функционируют в режиме, ранее установленного с текущим узлом, обмена данными; связь с USP не выполняется, но USP может изменять своё состояние обслуживая требования других узлов; линия  $l_{sk}$  восстанавливается;
- состояние 2: элемент USP восстанавливается после отказа (отвечает отказом обслуживания т.к. находится в состоянии «занят»); элемент TUC функционирует; TPD – ожидает восстановления USP;  $l_{sk}$  – восстанавливается;

- состояние 3: элемент ТПД восстанавливается после отказа; элементы ТУС и УСП функционируют;  $l_{sk}$  – восстанавливается;
- состояние 1.2: вслед за отказом УСП произошел отказ ТУС, элементы УСП и ТУС восстанавливаются; ТПД исправна и находится в ожидании восстановления элементов УСП и ТУС; восстановление УСП выполняется после восстановления ТУС;  $l_{sk}$  – восстанавливается;
- состояние 1.3: произошел последовательный отказ элементов ТПД и ТУС (ТУС и ТПД); УСП исправен и находится в режиме ожидания восстановления элементов; восстановление ТПД возможно только после восстановления ТУС;  $l_{sk}$  – восстанавливается;
- состояние 2.3: произошел последовательный отказ элементов ТПД и УСП; ТУС продолжает функционировать; восстановление ТПД возможно только после восстановления УСП;  $l_{sk}$  – восстанавливается;
- состояние 1.2.3: произошел последовательный отказ элементов ТПД, УСП и ТУС; элементы восстанавливаются после отказа; первоначально восстанавливается ТУС, затем УСП и затем ТПД;  $l_{sk}$  – восстанавливается.

Пусть отказы элементов ТУС, УСП и ТПД происходят с интенсивностями  $\{\lambda_{\text{ТУС}}, \lambda_{\text{УСП}}, \lambda_{\text{ТПД}}\}$  соответственно, где  $w_{\text{УСП}} \equiv \lambda_{\text{УСП}}$ . Соответственно, интенсивности восстановления элементов ТУС, УСП и ТПД, соответственно равны  $\{\mu_{\text{ТУС}}, \mu_{\text{УСП}}, \mu_{\text{ТПД}}\}$ .

Тогда, на основе представленного графа (раздел 3.2) и заданных условий функционирования (глава 2) элементов получена система дифференциальных уравнений состояний линии  $l_{sk}$ :

$$\begin{cases} p'_0(t) = -(\lambda_{\text{ТУС}} + \lambda_{\text{УСП}} + \lambda_{\text{ТПД}})p_0(t) + \mu_{\text{ТУС}}p_1(t) + \mu_{\text{УСП}}p_2(t) + \mu_{\text{ТПД}}p_3(t) \\ p'_1(t) = -(\mu_{\text{ТУС}} + \lambda_{\text{УСП}} + \lambda_{\text{ТПД}})p_1(t) + \lambda_{\text{ТУС}}p_0(t) \\ p'_2(t) = -(\mu_{\text{УСП}} + \lambda_{\text{ТУС}})p_2(t) + \lambda_{\text{УСП}}p_0(t) + \mu_{\text{ТУС}}p_{1.2}(t) \\ p'_3(t) = -(\mu_{\text{ТПД}} + \lambda_{\text{ТУС}} + \lambda_{\text{УСП}})p_3(t) + \lambda_{\text{ТПД}}p_0(t) + \mu_{\text{ТУС}}p_{1.3}(t) + \mu_{\text{УСП}}p_{2.3}(t) \\ p'_{1.2}(t) = -\mu_{\text{ТУС}}p_{1.2}(t) + \lambda_{\text{ТУС}}p_2(t) + \lambda_{\text{УСП}}p_1(t) \\ p'_{1.3}(t) = -(\mu_{\text{ТУС}} + \lambda_{\text{УСП}})p_{1.3}(t) + \lambda_{\text{ТПД}}p_1(t) + \lambda_{\text{ТУС}}p_3(t) \\ p'_{2.3}(t) = -(\mu_{\text{УСП}} + \lambda_{\text{ТУС}})p_{2.3}(t) + \lambda_{\text{УСП}}p_3(t) + \mu_{\text{ТУС}}p_{1.2.3}(t) \\ p'_{1.2.3}(t) = -\mu_{\text{ТУС}}p_{3.2.1}(t) + \lambda_{\text{УСП}}p_{1.3}(t) + \lambda_{\text{ТУС}}p_{2.3}(t) \end{cases} \quad (3.7.1)$$

Стационарные вероятности системы уравнений (3.7.1) находятся в следующей зависимости:

$\sum_i p_i(t) = 1$ ;  $p_0(0) = 1$ ;  $p_i(0) = 0$ , где  $i = \{1, 2, \dots, 1.2.3\}$ . Решением системы уравнений (3.7.1) являются выражения для вероятностей нахождения системы в стационарном состоянии  $p_i(t)$ . Надежность линии передачи данных определяется вероятностью нахождения системы в исправном состоянии с вероятностью при  $t \rightarrow \infty$ :

$$p_0 = \frac{\mu_{\text{ТУС}}\mu_{\text{УСП}}\mu_{\text{ТПД}}*(\lambda_{\text{УСП}}+\mu_{\text{ТУС}})*(\lambda_{\text{УСП}}+\lambda_{\text{ТПД}}+\mu_{\text{ТУС}})}{(\lambda_{\text{ТУС}}+\mu_{\text{ТУС}})*(\lambda_{\text{ТУС}}\lambda_{\text{УСП}}+(\lambda_{\text{УСП}}+\mu_{\text{ТУС}})*(\lambda_{\text{УСП}}+\mu_{\text{УСП}}))*(\lambda_{\text{ТУС}}\lambda_{\text{ТПД}}+(\lambda_{\text{УСП}}+\lambda_{\text{ТПД}}+\mu_{\text{ТУС}})*(\lambda_{\text{ТПД}}+\mu_{\text{ТПД}}))}, \quad (3.7.2)$$

которая является коэффициентом готовности линии передачи данных:

$$F_{\text{ЛПД}} \equiv p_0. \quad (3.7.3)$$

Для формирования маршрута передачи данных и вычисления значения его метрики (раздел 3.1) требуется определить дополнительные показатели надежности такие, как интенсивности отказов и восстановления линии передачи данных. В соответствии с графом состояний (рисунок 3.7.1) линия имеет одно исправное состояние, обозначенное индексом 0. Тогда, интенсивность отказов линии определяется суммой интенсивностей отказов её элементов [18]:

$$\lambda_{\text{ЛПД}} = \sum_i \lambda_i, \quad (3.7.4)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивности отказов элементов линии передачи данных  $\{\lambda_{\text{ТУС}}, \lambda_{\text{УСП}}, \lambda_{\text{ТПД}}\}$ .

Следовательно, среднее время безотказной работы линии передачи данных равно:

$$T_{\text{ЛПД}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ЛПД}}}. \quad (3.7.5)$$

Соответственно, среднее время восстановления системы определяется равенством, полученным в [18]:

$$T_{\text{ЛПД,в}} = \frac{1-F_{\text{ЛПД}}}{F_{\text{ЛПД}}} T_{\text{ЛПД}}. \quad (3.7.6)$$

Тогда, интенсивность восстановления линии передачи данных определяется отношением:

$$\mu_{\text{ЛПД}} = \frac{1}{T_{\text{ЛПД,в}}}. \quad (3.7.7)$$

Для определения зависимостей коэффициента готовности  $F_{\text{ЛПД}}$  линии выполнено математическое моделирование при следующих исходных данных:

- $n_{\text{ТУС}} = 1, 2, 3, 4$ : количество каналов установления соединения в составе трассы установления соединения (количество повторных попыток установления соединения);
- $w_{\text{УСП}} = 0.039$ : интенсивность обращений (отказов) узла следующего перехода (приложение Б.4, таблицы: Б.4.1, Б.4.2);
- $\mu_{\text{УСП}} = 0.1405$ : интенсивность восстановления узла следующего перехода (приложение Б.4, таблицы: Б.4.1, Б.4.2);
- параметры интерфейсов идентичны;
- $n_{\text{И}} = 1, 2, 3, 4$ : количество каналов передачи данных в составе каждого интерфейса;
- $r = 1$ : количество повторных попыток передачи кадра в канале передачи данных;
- $\lambda_{e.\text{УС}.i} = \{1.4843 - 0.015\}$  – интенсивность отказов  $i$ -го канала установления соединения (таблица Б.5.2, приложение Б.5);

- $\mu_{e.yc.i} = \{0.015 - 1.4843\}$  – интенсивность восстановления  $i$ -го канала установления соединения (таблица Б.5.2, приложение Б.5);
- $\lambda_{e.пд.i} = \{1.4843 - 0.015\}$  – интенсивность отказов  $i$ -го канала передачи данных (таблица Б.5.2, приложение Б.5);
- $\mu_{e.пд.i} = \{0.015 - 1.4843\}$  – интенсивность восстановления  $i$ -го канала передачи данных (таблица Б.5.2, приложение Б.5).

В результате математического моделирования получены зависимости коэффициента готовности линии передачи данных от интенсивности отказов, составляющих её элементов (рисунок 3.7.3). Численные результаты математического моделирования: значения коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений линии при различном количестве каналов установления соединения  $n_{TUC} = 1, 2, 3, 4$  и каналов передачи данных  $n_{И} = 1, 2, 3, 4$  приведены в таблице Б.8.1 (Приложение Б.8).

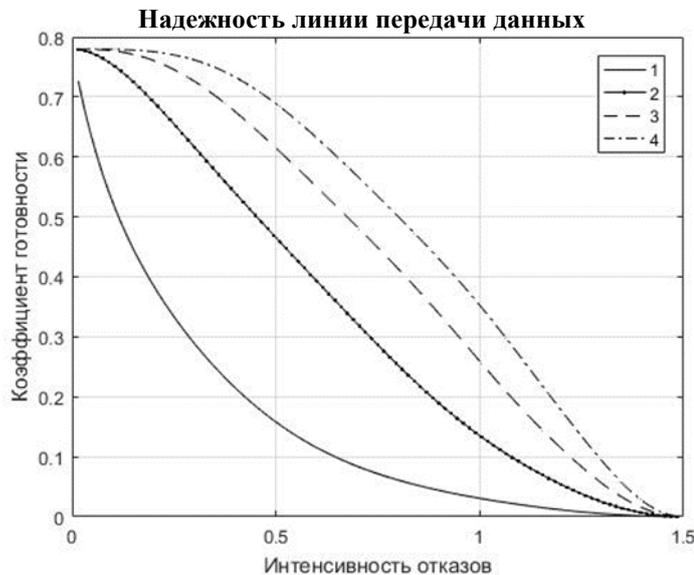


Рисунок 3.7.3 Коэффициент готовности линии передачи данных при различных значениях каналов установления соединения передачи данных;  $n_{TUC} = n_{И} = 1(1)$ ;  $n_{TUC} = n_{И} = 2(2)$ ;  $n_{TUC} = n_{И} = 3(3)$ ;  $n_{TUC} = n_{И} = 4(4)$ ;  $w_{УСП} = 0.039$

Анализ полученных результатов показывает, что применение резервирования методом замещения каналов в составах трассы установления соединения и трассы передачи данных повышает надежность линии, что подтверждается ростом  $F_{лпд}$  пропорционально росту количества резервных каналов (таблица 3.7.1; рисунок 3.7.3).

Таблица 3.7.1 Средние значения коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений линии передачи данных при различных значениях  $n_{\text{ТУС}}$  каналов установления соединения и  $n_{\text{И}}$  каналов передачи данных, где  $n_{\text{ТУС}} = 1, 2, 3, 4$  и  $n_{\text{И}} = 1, 2, 3, 4$

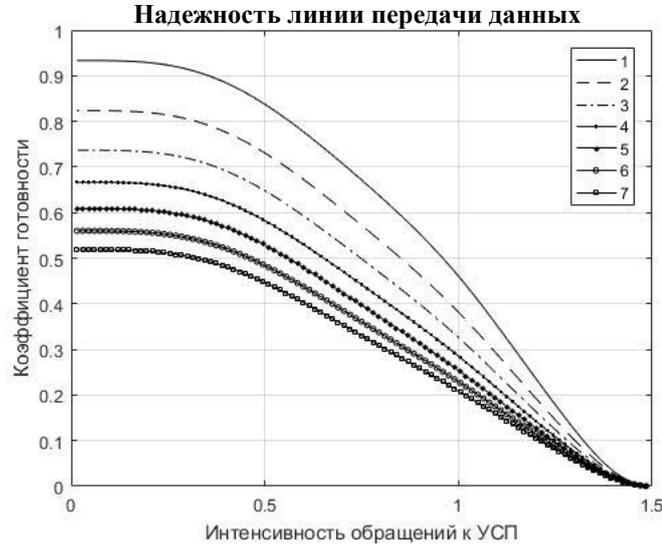
Количество каналов УС и ПД ( $n_{\text{ТУС}}/n_{\text{И}}$ )	Коэффициент готовности (Fлпд.)	Интенсивность отказов ( $\lambda_{\text{лпд}}$ )	Интенсивность восстановления ( $\mu_{\text{лпд}}$ )
1	0.151	2.14	0.36
2	0.328	1.36	0.522
3	0.424	1.04	0.553
4	0.479	0.87	0.522

Значительное влияние на величину коэффициента готовности линии передачи данных оказывает готовность узла следующего перехода к обработке поступающих запросов передачи данных (раздел 3.5).

Для исследования зависимости коэффициента готовности линии передачи данных  $F_{\text{лпд}}$  от готовности узла следующего перехода выполнено математическое моделирование при следующих исходных данных:

- $n_{\text{ТУС}} = 4$ : количество каналов установления соединения в составе трассы установления соединения (количество повторных попыток установления соединения);
- $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$ : интенсивность обращений к узлу следующего перехода (изменяется с шагом 0.01);
- $\mu_{\text{УСП}} = \{0.14 \div 0.01\}$ : интенсивность восстановления узла следующего перехода (изменяется с шагом 0.01);
- $n_{\text{И}} = 4$ : количество каналов передачи данных в составе каждого интерфейса;
- $r = 1$ : количество повторных попыток передачи кадра в канале передачи данных;
- $\lambda_{e.\text{УС}.i} = \{1.4843 - 0.015\}$  – интенсивность отказов  $i$ -го канала установления соединения (таблица Б.5.2, приложение Б.5);
- $\mu_{e.\text{УС}.i} = \{0.015 - 1.4843\}$  – интенсивность восстановления  $i$ -го канала установления соединения (таблица Б.5.2, приложение Б.5);
- $\lambda_{e.\text{ПД}.i} = \{1.4843 - 0.015\}$  – интенсивность отказов  $i$ -го канала передачи данных (таблица Б.5.2, приложение Б.5);
- $\mu_{e.\text{ПД}.i} = \{0.015 - 1.4843\}$  – интенсивность восстановления  $i$ -го канала передачи данных (таблица Б.5.2, приложение Б.5).

Численные результаты математического моделирования – зависимости коэффициента готовности линии передачи данных (рисунок 3.7.4), где:  $n_{\text{ТУС}} = 4$  и  $n_{\text{И}} = 4$  при интенсивности обращений к узлу следующего перехода:  $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$  приведены в таблице Б.8.2



(Приложение Б.8). Полученные средние значения  $F_{\text{ЛПД}}$  приведены в таблице 3.7.2.

Рисунок 3.7.4 Коэффициент готовности линии передачи данных при различных значениях интенсивности обращений к узлу следующего перехода;  $w_{\text{УСП}}$ : 0.01 (1); 0.03(2); 0.05(3); 0.07(4); 0.09(5); 0.11(6); 0.13(7);  $n_{\text{ТУС}} = 4$  и  $n_{\text{И}} = 4$

Анализ зависимостей показывает, что время нахождения узла следующего перехода в занятом состоянии прямо-пропорционально интенсивности запросов передачи данных к узлу. Увеличение времени нахождения узла следующего перехода в занятом состоянии приводит к снижению коэффициента готовности линии передачи данных (таблица 3.7.2; рисунок 3.7.4).

Таблица 3.7.2 Среднее значение коэффициента готовности линии передачи данных  $F_{\text{ЛПД}}$  при различных значениях интенсивности запросов готовности узла следующего перехода  $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$ , где  $n_{\text{ТУС}} = 4$  и  $n_{\text{И}} = 4$

Интенсивность запросов готовности узла следующего перехода $w_{\text{УСП}}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Коэффициент готовности линии передачи данных $F_{\text{ЛПД}}$	0,5909	0,5475	0,5102	0,478	0,4496	0,4246	0,4023

Продолжение таблицы 3.7.2 Среднее значение коэффициента готовности линии передачи данных  $F_{\text{ЛПД}}$  при различных значениях интенсивности запросов готовности узла следующего перехода  $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$ , где  $n_{\text{ТУС}} = 4$  и  $n_{\text{И}} = 4$

Интенсивность запросов готовности узла следующего перехода $w_{\text{УСП}}$	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14
Коэффициент готовности линии передачи данных $F_{\text{ЛПД}}$	0,3823	0,3642	0,3478	0,3329	0,3192	0,3066	0,295

Анализ полученных результатов показывает, что:

- надежность системы – линия передачи данных не превышает надежности составляющих её элементов;
- наибольшее влияние на величину коэффициента готовности оказывает готовность узла следующего перехода;
- такие элементы линии передачи данных как трасса установления соединения и трассы передачи данных позволяют значительно повысить надежность по сравнению с использованием отдельных каналов за счет применения резервирования;
- линия передачи данных является восстанавливаемой системой со сложной структурой, обеспечивающей обмен данными соседних узлов условиях нестационарности физических каналов, функционального разделения каналов на множества установления соединения и передачи данных, конкуренции узлов за среду установления соединения, множества потоков данных, проходящих через каждый узел следующего перехода.

Для сравнения эффективности предложенной схемы линии передачи данных получены показатели надежности взаимодействия соседних узлов при использовании отдельных каналов в составе линии (таблица 3.7.3).

Таблица 3.7.3 Средние значения коэффициента готовности линии передачи данных при различных значениях интенсивности запросов готовности узла следующего перехода  $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$ , где  $n_{\text{ТУС}} = 1$  и  $n_{\text{И}} = 1$

Интенсивность запросов готовности узла следующего перехода $w_{\text{УСП}}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Коэффициент готовности линии передачи данных $F_{\text{ЛПД}}$	0,1998	0,1800	0,1639	0,1507	0,1395	0,1300	0,1217

Продолжение таблицы 3.7.3 Средние значения коэффициента готовности линии передачи данных при различных значениях интенсивности запросов готовности узла следующего перехода  $w_{усп} = \{0.01 \div 0.14\}$ , где  $n_{тус} = 1$  и  $n_{и} = 1$

Интенсивность запросов готовности узла следующего перехода $w_{усп}$	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14
Коэффициент готовности линии передачи данных $F_{лпд}$	0,1145	0,1081	0,1025	0,0974	0,0928	0,0887	0,0850

Надежность линии передачи данных есть стационарная вероятность её нахождения в исправном состоянии при длительной эксплуатации. Наблюдается значительное повышение надежности линии передачи данных по сравнению с использованием отдельных каналов. Кроме того, предложенная модель линии передачи данных показывает меньшую зависимость коэффициента готовности от интенсивности запросов к узлу следующего перехода, что выражается в росте  $r_{лпд}$  при увеличении  $w_{усп}$  (таблица 3.7.4).

В результате получены структура и метод формирования линии передачи данных, основу которой составляют разработанные в предыдущих разделах элементы:

- трасса установления соединения,
- узел следующего перехода,
- трасса передачи данных.

В результате моделирования получены зависимости коэффициента готовности, интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных, определяющие её надежность на период обновления отношений соседства. Коэффициент готовности определяет вероятность исправного состояния линии передачи данных при её эксплуатации в установившемся режиме.

Анализ результатов математического моделирования показал, что надежность линии передачи данных превышает надежность обмена данными в отдельном физическом канале. Полученная структура линии передачи данных обеспечивает слабую зависимость показателей её надежности от состояния отдельных физических каналов, составляющих основу элементов линии передачи данных. Длительность периода квазистационарности значительно превышает период квазистационарности отдельных физических каналов.

Полученная модель надежности линии передачи данных учитывает:

- изменения качества физических каналов,
- особенности физической среды исследуемой коммуникационной системы,
- вероятности приема кадров управления и данных,

- особенности алгоритмов обмена данными,
- интенсивности потоков данных.

Полученная модель надежности линии передачи данных содержит в своем составе механизмы повышения надежности передачи данных и средства адаптации линии передачи данных к изменяющимся условиям физической среды.

В результате структурно-параметрического синтеза получен критерий оценки надежности маршрутов доставки сообщений – коэффициент готовности. Полученный критерий определяет вероятность исправного состояния вероятного маршрута при попытке его использования для доставки сообщений конечному абоненту. В соответствии с синтезированной иерархической структурой маршрута доставки сообщений коэффициент готовности агрегирует в своем составе показатели качества и оценки надежности, составляющих его элементов:

- вероятность исправного состояния канала связи, его интенсивности отказов и восстановлений ( $P_{иск}, \lambda_{иск}, \mu_{иск}$ ), полученные относительно оценки качества сигнала  $p_{ош.} \leq p_{ош. доп}$ , принимаемого от заданного соседнего узла на интервале обновления отношений соседства  $T_{оос}$  (раздел 3.3);
- интенсивности отказов и восстановлений ( $\lambda_{сус}, \mu_{сус}$ ) среды установления соединения, формируемой для каждого отношения в каждом канале установления соединения, где  $(\lambda_{сус}, \mu_{сус}) = f(\{\lambda_{иск.i}\}, \{\mu_{иск.i}\})$  (раздел 3.4.1);
- интенсивности отказов и восстановлений ( $\lambda_{тус}, \mu_{тус}$ ) трассы установления соединения, формируемой для каждого отношения соседства, элементами которой являются среды установления соединения, где  $(\lambda_{тус}, \mu_{тус}) = f(\{(\lambda_{сус}, \mu_{сус})_i\}, r)$ , где  $r$  – допустимое количество попыток установления соединения (раздел 3.4.2);
- интенсивности запросов передачи данных и восстановлений ( $w_{зпд}, \mu_{зпд}$ ) узла следующего перехода, где  $(\mu_{зпд}) = f(T_{пд}, D, T_{оос})$ , где  $T_{пд}$  – среднее время передачи блока данных,  $D$  – размера передаваемого блока данных,  $T_{оос}$  – период обновления отношений соседства (раздел 3.5);
- интенсивности отказов и восстановлений среды передачи данных ( $\lambda_{спд}, \mu_{спд}$ ), формируемой для каждого отношения соседства в каждом канале передачи данных, где  $(\lambda_{спд}, \mu_{спд}) = f((\lambda_{иск}, \mu_{иск}), r)$ , где  $r$  – допустимое количество транзакций передачи кадра данных до определения отказа среды (раздел 3.6.1);

- интенсивности отказов и восстановлений интерфейса узла  $(\lambda_{и}, \mu_{и})$ , формируемого для каждого отношения соседства, где  $(\lambda_{и}, \mu_{и}) = f(\{(\lambda_{спд}, \mu_{спд})_i\}, r)$ , где  $r$  – количество сред/каналов передачи данных, составляющих интерфейс (раздел 3.6.1);
- интенсивности отказов и восстановлений  $(\lambda_{тпд}, \mu_{тпд})$  трассы передачи данных, формируемой на основе интерфейсов для каждого отношения соседства, где  $(\lambda_{тпд}, \mu_{тпд}) = f(\{\lambda_{и.i}\}, \{\mu_{и.i}\})$  (раздел 3.6.2);
- интенсивности отказов и восстановлений  $(\lambda_{лпд}, \mu_{лпд})$  линии передачи данных, формируемой для каждого отношения соседства и состоящей из трассы установления соединения, узла следующего перехода и трассы передачи данных, где  $(\lambda_{лпд}, \mu_{лпд}) = f((\lambda_{тус}, \mu_{тус}), (w_{зпд}, \mu_{зпд}), (\lambda_{тпд}, \mu_{тпд}))$  (раздел 3.7);
- коэффициент готовности  $(F_{см})$  сообщенного маршрута, переданный узлом следующего перехода (раздел 3.1).

Тогда, в соответствии с выражением (3.1.7), критерий оценки надежности маршрута доставки сообщений от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$  через узел следующего перехода  $k$  определяется зависимостью:

$$F_{M.sd} = \frac{\mu_{лпд.sk}}{\lambda_{лпд.sk} + \mu_{лпд.sk}} * F_{см.kd} \quad (3.7.8)$$

Таким образом, в результате структурного синтеза получена блочно-иерархическая структура линии передачи данных. Линия передачи данных есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов. В результате параметрического синтеза в пространстве параметров надежности элементов, составляющих линию передачи данных, получены параметры надежности линии передачи данных: коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показал, что линия передачи данных обеспечивает оптимизацию показателей надежности обмена данными между соседними узлами. Так, показатель коэффициента готовности линии передачи данных с резервированием ( $n = 4$ ) составил  $F_{лпд} = 0.59$ , тогда как коэффициент готовности линии передачи данных без резервирования ( $n = 1$ ) составил  $F_{лпд} = 0.20$  при интенсивности запросов узла следующего перехода  $w_{усп} = 0.01$ . Наибольшее влияние на значение показателя надежности линии передачи данных оказывает готовность узла следующего перехода, которая зависит от интенсивности информационных потоков, проходящих через заданный узел. Получено значительное снижение надежности линии передачи данных  $F_{лпд} = 0.30$  ( $n = 4$ ) при росте интенсивности запросов узла следующего перехода  $w_{усп} = 0.14$  за счет снижения коэффициента готовности узла следующего перехода. Изменение показателя надежности линии передачи данных является событием изменения

топологии коммуникационной системы, которое вызывает перераспределение информационных потоков в линиях передачи данных коммуникационной системы.

### 3.8. Выводы по главе 3

1. В результате структурно-параметрического синтеза получено, что маршрут доставки сообщений есть восстанавливаемая система, обеспечивающая доставку сообщений конечному абоненту. В результате структурного синтеза и на основе анализ алгоритма диффузного распространения топологической информации идентифицированы элементы маршрута доставки сообщений: линия передачи данных, соединяющая узел источника с узлом следующего перехода, и маршрут передачи данных до узла назначения, сообщенный узлом следующего перехода. Идентифицированы параметры маршрута доставки сообщений: интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных и коэффициент готовности сообщенного маршрута. В результате параметрического синтеза получен критерий оценки надежности маршрута. Получена целевая функция для формирования оптимального по критерию надежности маршрута доставки сообщений. Коэффициент готовности определен в качестве критерия оценки надежности маршрута.
2. 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.
3. Основу трасс установления соединения и передачи данных составляют нестационарные каналы связи. Определен метод оценки надежности канала связи на основе: сбора статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов, указания пороговых значений качества, формирования последовательности вероятностей надежного приема дискретных сообщений и получения прогнозируемой на период обновления отношений соседства вероятности исправного состояния канала на основе метода экстраполяции к полученной последовательности. Идентифицированы параметры оценки качества каналов связи: вероятность исправного состояния канала, интенсивности отказов и восстановлений, прогнозируемые на период обновления отношений соседства.
4. В результате структурного синтеза в соответствии с принятыми алгоритмами обмена данными получена структура среды установления соединения, которая является элементов трассы установления соединения. Среда установления соединения есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов. В результате параметрического

синтеза на основе параметров надежности каналов получены параметры надежности среды установления соединения: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показал, что среда установления соединения является нестационарной в следствие нестационарности используемых каналов связи, надежность среды установления соединения не превышает надежности каналов связи. Так, средняя значение коэффициента готовности среды установления соединения составил  $\overline{F_{\text{СУС}}} = 0.32$  ( $\sigma_{F_{\text{СУС}}} = 0.16$ ) при средней вероятности исправного состояния канала  $\overline{P_{\text{ИСК}}} = 0.56$  ( $\sigma_{\text{ИСК}} = 0.15$ ). Следовательно, для повышения надежности обмена данными необходимо агрегирование элементов – среда установления соединения в резервированную систему. В результате структурно-параметрического синтеза трассы установления соединения разработаны и синтезированы: структура и 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 ходе 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  $r = 4$  сред установления соединения, составило  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.74$  ( $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.18$ ) при среднем значении надежности среды установления соединения:  $\overline{F_{\text{СУС}}} = 0.32$  ( $\sigma_{F_{\text{СУС}}} = 0.16$ ).

5. Синтезированы параметры надежности узла следующего перехода: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показывает, что готовность узла к обработке запросов передачи данных зависит от интенсивности поступления запросов, надежности трасс установления соединения и передачи данных, размера блока передаваемых данных, алгоритма обмена данными. Рост интенсивности запросов передачи данных приводит к снижению коэффициента готовности узла. Так, коэффициент готовности узла составил  $F_{\text{УСП}} = 0.81$  и  $F_{\text{УСП}} = 0,06$  при интенсивности запросов передачи данных  $w_{\text{ЗПД}} = 0.01$  и  $w_{\text{ЗПД}} = 0.9$  соответственно. Следовательно, управление потоками данных позволяет изменять показатель коэффициента готовности узла следующего перехода.
6. В результате структурного синтеза в соответствии с принятыми алгоритмами обмена данными получена структура канала передачи данных, который является элементом системы – интерфейс узла. Канал передачи данных есть восстанавливаемая система с

резервированием замещением. В результате параметрического синтеза на получены параметры надежности каналов передачи данных: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показал, что надежность канала передачи данных зависит от качества физического канала и количества допустимых попыток передачи кадра данных. Рост количества допустимых попыток передачи приводит к росту задержки определения отказа канала. Надежность канала не является достаточной для обеспечения обмена полезными данными в случае возникновения длительных замираний передаваемого сигнала. Следовательно, для повышения надежности обмена данными необходимо агрегирование элементов – каналы передачи данных в резервированную систему. В результате структурно параметрического синтеза интерфейса разработаны и синтезированы: модель надежности интерфейса узла, где интерфейс есть восстанавливаемая система с резервированием методом замещения, состоящая из каналов передачи данных; параметры интерфейса: интенсивности отказов и восстановлений. Анализ полученных результатов математического моделирования показал, что надежность интерфейса превышает надежности каналов передачи данных. Так, среднее значение коэффициента готовности интерфейса составило  $\overline{F}_И = 0.95$  ( $\sigma_И = 0.09$ ). Тогда как, среднее значение коэффициента готовности канала передачи данных получено равным  $\overline{F}_{e.пд} = (0.5; 0.66; 0.78; 0.8)$  при соответствующем количестве попыток передачи кадра данных ( $r = 1, 2, 3, 4$ ). Интерфейсы узлов являются элементами трасс передачи данных. В результате структурно параметрического синтеза трассы передачи данных разработаны и синтезированы: структура и модель надежности трассы передачи данных, как восстанавливаемой системы с последовательным соединением элементов – интерфейсов узлов; параметры надежности трассы установления соединения: интенсивности отказов и восстановлений. В результате моделирования получено среднее значение коэффициента готовности трассы передачи данных составило  $\overline{F}_{тпд} = 0.91$  ( $\sigma_{тпд} = 0.09$ ).

7. В результате структурного синтеза получена блочно-иерархическая структура линии передачи данных. Линия передачи данных есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов. В результате параметрического синтеза в пространстве параметров надежности элементов, составляющих линию передачи данных, получены параметры надежности линии передачи данных: коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений. Анализ результатов математического моделирования показал, что линия передачи данных обеспечивает оптимизацию показателей надежности обмена данными между соседними узлами. Так, показатель коэффициента готовности линии передачи данных с резервированием ( $n = 4$ ) составил

$F_{\text{ЛПД}} = 0.59$ , тогда как коэффициент готовности линии передачи данных без резервирования ( $n = 1$ ) составил  $F_{\text{ЛПД}} = 0.20$  при интенсивности запросов узла следующего перехода  $w_{\text{УСП}} = 0.01$ . Наибольшее влияние на значение показателя надежности линии передачи данных оказывает готовность узла следующего перехода, которая зависит от интенсивности информационных потоков, проходящих через заданный узел. Получено значительное снижение надежности линии передачи данных  $F_{\text{ЛПД}} = 0.30$  ( $n = 4$ ) при росте интенсивности запросов узла следующего перехода  $w_{\text{УСП}} = 0.14$  за счет снижения коэффициента готовности узла следующего перехода. Изменение показателя надежности линии передачи данных является событием изменения топологии коммуникационной системы, которое вызывает перераспределение информационных потоков в линиях передачи данных коммуникационной системы.

8. Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза оптимизированного по критерию надежности маршрута доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с нестационарной топологией. Предложенный алгоритм основан на блочно-иерархическом принципе и позволяет: определить элементы системы, установить одноуровневые и иерархические взаимосвязи элементов системы, синтезировать параметры элементов системы, сформировать возможные маршруты доставки сообщений с наилучшими показателями надежности.
9. Разработан метод оценки надежности маршрутов доставки сообщений конечному получателю. Предложенный метод основан на оценке надежности каналов связи, блочно-иерархическом принципе и результатах параметрического синтеза параметров элементов, составляющих маршрут. Предлагаемый метод позволяет получить вероятностную характеристику исправного состояния возможного маршрута доставки сообщений в коммуникационной системе с самоорганизующейся многосвязной нестационарной топологией.
10. 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.

## ГЛАВА 4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В ИССЛЕДУЕМОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

### 4.1. Разработка имитационной модели исследуемой коммуникационной системы

С целью проверки эффективности разработанных моделей и методов разработана имитационная модель исследуемой коммуникационной системы с самоорганизующейся многосвязной топологией [49]. Параметры каналов связи исследуемой коммуникационной системы соответствуют параметрам частотных каналов ДКМ диапазона. На рисунке 4.1.1 показана структурная схема имитационной модели исследуемой коммуникационной системы в составе:

- среды доступа (раздел 1.1, 1.2, 2.1), имитирующей передачу сигналов в частотных каналах ДКМ диапазона с учетом особенностей их распространения;
- узлов ( $n_0, n_1, n_2, n_3$ ), выполняющих функции:
  - доступа к физической среде, управления ресурсом физических каналов,
  - приема и передача кадров управления и данных,
  - обнаружения соседних узлов, установления и поддержки отношений соседства,
  - сбора и обработки данных о качестве принимаемых от соседних узлов сигналов,
  - реализации протоколов обмена данными с соседними узлами,
  - формирования трассы установления соединения, трассы передачи данных, линий передачи данных и определение их надежности (раздел 2.2);
- система, передающая сигналы синхронизации узлам коммуникационной системы (ГЛОНАСС).

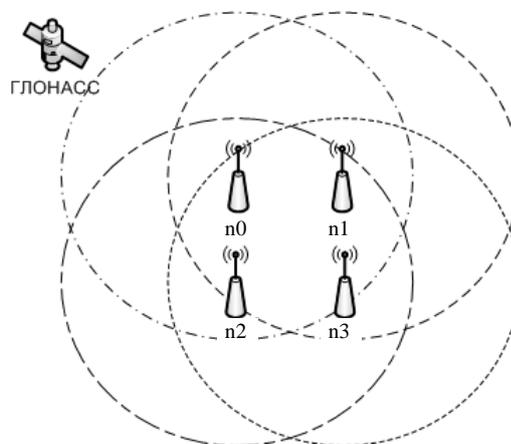


Рисунок 4.1.1 Структурная схема имитационной модели исследуемой коммуникационной системы

Модель исследуемой коммуникационной системы представлена группой из четырех соседних узлов с именами:  $\{n_0, n_1, n_2, n_3\}$  обозначенных на рисунке 4.1.1 соответствующими номерами. Окружностями условно показаны зоны распространения сигналов узлов.

Среда передачи данных имитационной модели реализована с учетом особенностей распространения сигнала в ДКМ диапазоне частот, а также таких параметров как:

- затухание мощности сигнала с расстоянием,
- чувствительность принимающего оборудования,
- флуктуации параметров среды распространения сигнала,
- возникновение случайных помех,
- возникновение сосредоточенных помех в результате конкуренции узлов за среду доступа,
- задержка распространения сигнала и т.п. (приложение В.1).

В модели узла реализованы функции физического, канального, сетевого уровней модели OSI, а также функции уровня приложений. На физическом уровне имитационная модель реализует прием, передачу и распространение сигналов в физической среде учитывая случайные изменения уровней мощности сигналов на входе принимающих узлов в результате флуктуации параметров среды, затухание мощности передаваемых сигналов пропорционально увеличению протяженности линий передачи данных, влияние случайных помех на передаваемый сигнал, задержку распространения сигналов в среде, управление множеством каналов установления соединения  $E_{УС}$  и передачи данных  $E_{ПД}$ , взаимодействие с которыми выполняется средствами приемопередающих модулей установления соединения и передачи данных узлов. В задачи приемопередающих модулей установления соединения и передачи данных входит формирование передаваемых последовательностей символов, передача и прием сигналов, определение оценки качества принимаемого сигнала и передача данной оценки модулям доступа к среде установления соединения и передачи данных после выполнения приема поступившего кадра.

Канальный уровень модели узла представлен модулями доступа к среде установления соединения и среде передачи данных, а также модулем управления узла. Модуль доступа к среде установления соединения выполняет задачи приема и передачи кадров в соответствии с принятыми правилами конкурентного доступа к среде (раздел 2.3). В модуле реализованы функции:

- синхронного доступа к среде на основе протокола Slotted Aloha [14, 15, 22, 26, 40, 49, 113] с  $p$ -настойчивостью [20, 22, 23, 24, 25];
- приема и передачи кадров;
- управление потоком кадров;

- индивидуальной и широковещательной адресации узлов;
- протоколов установления соединения и обмена данными;
- определения качества принимаемых от соседних узлов сигналов в заданных каналах и формирование базы данных полученных оценок;
- обнаружение соседних узлов, установление и поддержка отношений соседства;
- взаимодействие с модулем управления.

В задачи модуля доступа к среде передачи данных входит прием и передача кадров данных, управление потоком передачи данных, передача данных в режиме «точка-точка» [49].

В модуле реализованы функции:

- асинхронного доступа к среде в режиме «точка-точка»;
- формирование кадров, их передача и прием в соответствии с принятыми алгоритмами (разделы 2.4.1, 2.4.2);
- определения качества принимаемых от соседних узлов сигналов в заданных каналах и формирование базы данных полученных оценок;
- управление потоком передаваемых данных;
- взаимодействие с модулем управления.

Модуль управления канальным уровнем узла выполняет следующие функции:

- широковещательная рассылка объявлений о присутствии узла в системе;
- управление включением узла в систему;
- формирование базы данных оценок надежности физических каналов;
- формирование базы данных соседних узлов;
- управление ресурсом каналов, формирование и поддержка единой среды установления соединения;
- обработка данных, принимаемых от внешней синхронизирующей системы (ГЛОНАСС), синхронизация работы модулей доступа к среде установления соединения и среде передачи данных;
- управление рассылкой уведомлений Hello (раздел 2.5);
- осуществление поддержки отношений соседства, определение периодов обновления отношений соседства, управление процессом обмена данными в ходе выполнения процедуры обновления отношений соседства (раздел 2.5);
- формирование и поддержка для каждого соседнего узла оценки надежности трассы установления соединения, узла следующего перехода, трассы передачи данных;

- формирование и поддержка для каждого соседнего узла оценки надежности линий передачи данных;
- управление ресурсом каналов, составляющих интерфейсы;
- формирование базы данных вероятных маршрутов доставки сообщений конечным абонентам;
- взаимодействие с модулями доступа к среде установления соединения, среде передачи данных, модулями пользовательских приложений и маршрутизации;
- управление очередью заданий, получаемых от модулей пользовательских приложений и маршрутизации;
- прием блоков данных от модулей установления соединения и передачи данных, адресованных текущему узлу и их передача модулям пользовательских приложений и маршрутизации;
- установление соединения с указанным соседним узлом, выбор каналов передачи данных и передача управления процедурой обмена данными модулю доступа к среде передачи данных [49].

Модель модуля приложений. Выполняет функции генератора требований обмена данными между приложениями. Модуль взаимодействует с модулем управления, через который определяет узлов, присутствующих в системе. В ходе работы модуль приложений с заданной интенсивностью создает запросы обмена данными с выбранными из списка узлами. Выбор адреса назначения выполняется случайно. В ходе обмена данными между модулями приложений выполняется передача блоков данных. Передача данных выполняется средствами модулей управления, установления соединения и модуля передачи данных.

Модуль сетевых сервисов выполняет обмен данными с соседними узлами в соответствии с алгоритмом диффузного распространения информации о топологии системы. Модуль сетевых сервисов получает от модуля управления узла весовые характеристики надежности инцидентных линий передачи данных узла. От соседних узлов модуль сетевых сервисов получает весовые характеристики сообщенных маршрутов. Используя весовые характеристики линий и сообщенных маршрутов, модуль сетевых сервисов выполняет расчет вероятных маршрутов передачи данных с метрикой по критерию надежности. Модуль сетевых сервисов является источником трафика в средах установления соединения и передачи данных.

Модуль имитации ГЛОНАСС выполняет рассылку синхросигналов. Передаваемые синхросигналы имеют в своем составе временные отсчеты, что позволяет узлам в любой момент времени определять активный канал установления соединения, момент начала его

использования, вести отсчеты слотов канала, поддерживать среду установления соединения (раздел 2.3).

Таким образом, 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. В основе имитационной модели реализована модель нестационарных каналов связи с аддитивной помехой в виде нормального шума. Разработка модели коммуникационной системы выполнена на базе системы дискретного моделирования событий “OMNeT++” с подключенной библиотекой моделей для проводных, беспроводных и мобильных сетей “INET”. Модули имитационной модели выполнены на языке C++ в среде разработки программного обеспечения Eclipse. Обработка результатов имитационного моделирования и построение графиков выполнено с помощью среды математического моделирования MATLAB R2016a. Для выполнения математического моделирования использовались система математических расчетов “Mathematica” и среда разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio 2015.

#### **4.2. Анализ показателей надежности каналов связи коммуникационной системы**

В имитационной модели оценка качества принимаемого сигнала выполняется на основе отношения мощностей сигнал/помеха (1.3.2), которое определяется в ходе приема кадров данных от заданного соседнего узла за время  $T_{\text{кадр.СУС}}$  (2.3.2, приложение А.1). Оценка качества физического канала выполняется по величине вероятности ошибки элемента сигнала  $p_{\text{ош.}}$  (3.3.1), связанной с  $z$  отношением (1.3.3).

Для проверки эффективности предложенных методов формирования маршрутов по критерию надежности в имитационной модели реализованы:

- случайные изменений мощности принимаемых сигналов в соответствии с нормальным законом распределения [108];
- действие сосредоточенных помех, создаваемых соседними узлами в результате конкуренции за среду (раздел 2.3);
- падение мощности передаваемых сигналов в зависимости от расстояния;
- и другие факторы, определяющие нестационарность физической среды (приложение В.1).

В ходе имитационного моделирования определение надежности физических каналов выполнялось методом, предложенным в разделе 3.3.

При выполнении моделирования были приняты следующие исходные данные:

- величина допустимой вероятности ошибки элемента сигнала (раздел 3.3):  $p_{\text{ош.доп.}} = 10^{-3}$ ;
- средняя продолжительность периода квазистационарности параметров физических каналов (2.5.3):  $T_{\text{КСК}} = 930\text{с.}$ ;
- максимальный период оценки качества канала (2.5.4):  $T_{\text{ОК}} = 465\text{с.}$ ;
- периода передачи Hello (2.5.1; приложение А.8):  $T_{\text{hello}} = 28\text{с.}$ ;
- время активности канала  $e_{\text{УС.}i} \in E_{\text{УС}}$  (2.3.1):  $T_{\text{К}} = 4\text{с.}$ ;
- период повторного измерения качества канала  $e_{\text{УС.}i} \in E_{\text{УС}}$  (2.5.2):  $T_{\text{п.и.к.}} = 224\text{с.}$ ;
- период достоверности оценки качества канала  $e_{\text{УС.}i} \in E_{\text{УС}}$  (2.5.6):  $T_{\text{д.о.к.}} = 448\text{с.}$

В ходе поддержки отношений соседства узлы с периодом  $T_{\text{ООС}} \leq T_{\text{д.о.к.}}$  (2.5.7) выполняют сбор статистических данных о качестве принимаемых сигналов. В случае если в течение  $T_{\text{hello}}$  от заданного соседнего узла  $k$  в заданном физическом канале  $e_{\text{УС.}i} \in E_{\text{УС}}$  не было получено кадра уведомления, то модуль управления текущего узла в соответствующей записи базы данных качества принимаемых сигналов, записывает  $p_{\text{ош.}i} = 1$ .

Для каждой пары соседних узлов  $\{s, k\} \in N$  в течение периода  $T_{\text{ООС}}^{s,k}$  формируются (обновляются) множества оценок качества физических каналов  $P_{\text{ош.}j}\{p_{\text{ош.}ij}\}$ , где  $j = 1, \dots, |E_{\text{УС}}|$ ;  $i = 1, 2, \dots$ ;  $p_{\text{ош.}ij}$  – вероятность ошибки элемента сигнала за время приема дискретного сообщения (кадра) длительностью  $T_{\text{кадр.СУС}}$  (2.3.2). При выполнении моделирования периоды  $T_{\text{ООС}}^{s,k}$  всех пар узлов были выбраны равными, однако, моменты начала выполнения процедуры обновления отношений соседства  $t_{\text{ООС}}$  для каждой пары узлов  $\{s, k\}$  назначались относительно времени установления отношений соседства и текущего состояния физической среды на момент попытки обновления отношений соседства. На рисунке 4.2.1 (1) показана вероятность ошибки элемента сигнала  $p_{\text{ош.}}$ , определенная узлом  $n1$  при приеме кадров от узла  $n0$  в физическом канале  $e_{\text{УС.}1} \in E_{\text{УС}}$  на интервале времени  $t = (0 \div 10^4)\text{с.}$  Линией 2 на рисунке 4.2.1 показан заданный уровень допустимой вероятности ошибки элемента сигнала  $p_{\text{ош.доп.}}$  (раздел 3.3). Численные результаты имитационного моделирования приведены в таблице В.2.1 (приложение В.2).

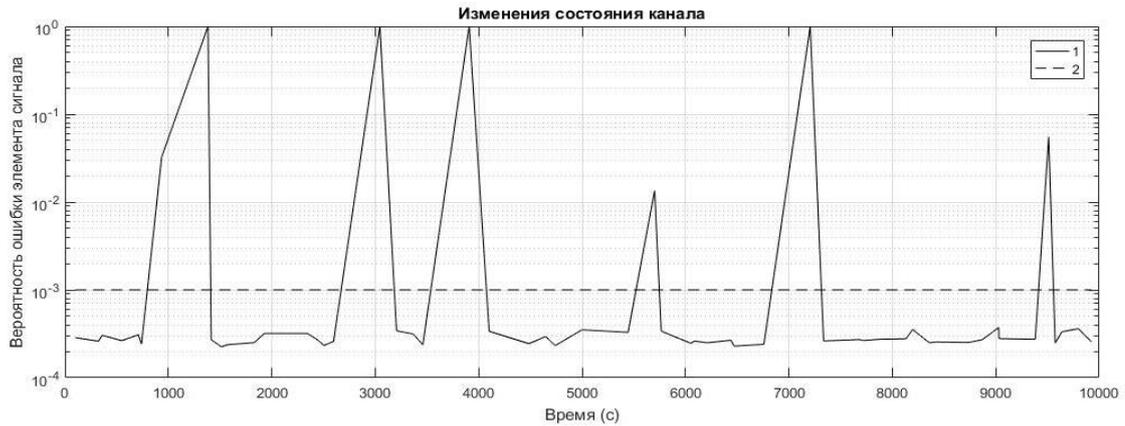


Рисунок 4.2.1 Вероятность ошибки элемента сигнала  $\{p_{\text{ош.}i}\}$  (1), определенная на интервале  $t = (0 \div 10^4)$  с; (2) – допустимая вероятность ошибки элемента сигнала  $p_{\text{ош.доп.}}$ .

Влияние интерференционных (раздел 2.3) и флуктуационных (раздел 3.3) помех на качество принимаемого сигнала отражено в изменениях значения  $p_{\text{ош.}}$  (рисунок 4.2.1, таблица В.2.1 приложение В.2).

В ходе моделирования обмена данными (раздел 2.3) в канале  $e_{\text{УС.1}} \in E_{\text{УС}}$  узлом  $n1$  при приеме кадров, передаваемых узлом  $n0$  определены изменения качества принимаемого сигнала так, что наблюдается чередование периодов исправного состояния (выполняется условие 3.3.2) и состояния восстановления канала (не выполняется условие 3.3.2):

– периоды исправного состояния канала:

- $t_0 = (0 \div 935,0138)$ с.;
- $t_2 = (1415,014 \div 3045,414)$ с.;
- $t_4 = (3206,214 \div 3908,614)$ с.;
- $t_6 = (4102,214 \div 5702,214)$ с.;
- $t_8 = (5765,414 \div 7206,214)$ с.;
- $t_{10} = (7335,814 \div 9511,814)$ с.;
- $t_{12} = (9575,014 \div 10000)$ с.;

– периоды восстановления канала:

- $t_1 = (935,0138 \div 1415,014)$ с.;
- $t_3 = (3045,414 \div 3206,214)$ с.;
- $t_5 = (3908,614 \div 4102,214)$ с.;
- $t_7 = (5702,214 \div 5765,414)$ с.;
- $t_9 = (7206,214 \div 7335,814)$ с.;
- $t_{11} = (9511,814 \div 9575,014)$ с.

Среднее значение вероятности ошибки элемента сигнала составило:  $\overline{p_{\text{ош.}}} = 0.0748$ ;  $\sigma_{p_{\text{ош.}}} = 0.2616$ ;  $\bar{z} = 31.8667$ ;  $\sigma_z = 10.18$  (таблица В.2.2; приложение В.2).

В результате применения метода оценки надежности (раздел 3.3) каждый узел пары  $\{s, k\} \in N$  для каждого канала  $e_{y.c.i} \in E_{y.c}$  сформировал множества оценок надежного приема дискретных сообщений  $\{P_{\text{нпдс}.i}\}$  и множество прогнозируемых оценок исправного состояния канала  $\{P_{\text{иск}.i}\}$ , полученных на интервале времени  $t = (0 \div 10^4)c$ .

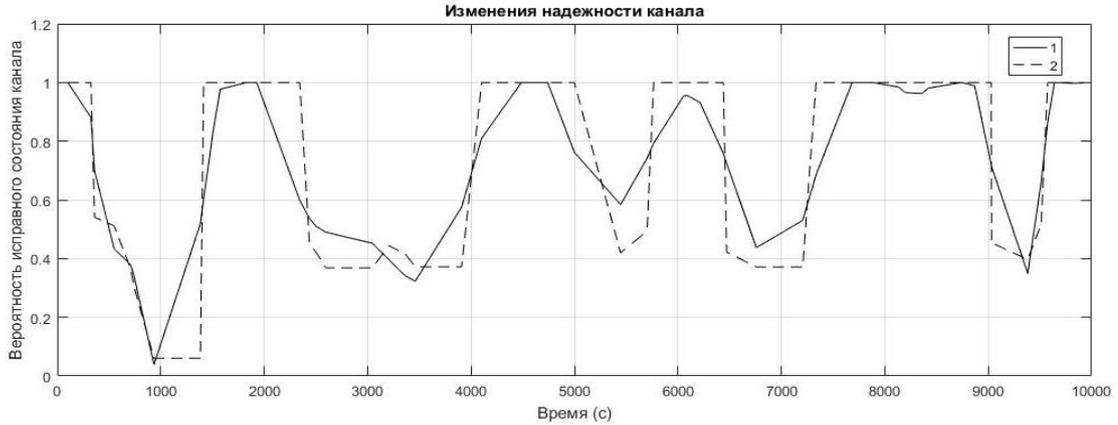


Рисунок 4.2.2 Вероятности надежного приема дискретного сообщения (1) и исправного состояния (2) физического канала  $e_{y.c.1} \in E_{y.c}$ , определенные узлом  $n1$  при получении кадров от узла  $n0$

Так, на рисунке 4.2.2 показаны вероятность надежного приема дискретного сообщения (кадра)  $\{P_{\text{нпдс}.i}\}$  (1) и вероятность исправного состояния канала  $\{P_{\text{иск}.i}\}$  (2), определенные узлом  $n1$  при получении кадров от узла  $n0$  в физическом канале  $e_{y.c.1} \in E_{y.c}$  и формировании последовательности вероятностей ошибок элементов сигнала  $\{p_{\text{ош}.i}\}$  в ходе имитационного моделирования продолжительностью  $T_{\text{exp}} = 10^4 c$ . Полученные в ходе имитационного моделирования численные результаты приведены в таблицы В.2.1 (приложение В.2).

Анализ полученных результатов показывает, что значительное влияние на качество канала оказывает интерференция сигналов соседних узлов, конкурирующих за среду (раздел 2.3). Так, в периоды времени  $t_1, t_3, t_5, t_9$  (рисунок 4.2.1) наблюдаются выбросы  $p_{\text{ош.}} = 1$  при, вызванные отсутствием кадров Hello от узла  $n0$  в заданном интервале обновления отношений соседства. При снижении  $p_{\text{ош.}}$  наблюдается рост  $P_{\text{нпдс.}}$ , так в момент времени  $t = 1831c$ , где  $p_{\text{ош.}} = 0.00025$  при  $p_{\text{ош.доп}} = 0.001$   $P_{\text{нпдс.}} = 1$ . Среднее значение вероятности надежного приема дискретного сообщения составило:  $\overline{P_{\text{нпдс.}}} = 0.7546$ ;  $\sigma_{p_{\text{нпдс.}}} = 0.3125$ .

Последовательность  $\{P_{\text{нпдс}.i}\}$  определяет надежность приема кадров текущим узлом  $n1$  от заданного соседнего узла  $n0$  в канале  $e_{y.c.1} \in E_{y.c}$  на предыдущем интервале обновления отношений соседства  $[t_i - T_{\text{оос}}, t_i]$ . Прогнозируемая на период  $[t_i, t_i + T_{\text{оос}}]$  оценка надежности представлена последовательностью  $\{P_{\text{иск}.i}\}$ . Оценка получена методом экстраполяции относительно последовательности  $\{P_{\text{нпдс}.i}\}$ . Так, на интервале времени  $t = \{740.4c, \dots, 935c\}$  при  $P_{\text{нпдс.}} = \{3.09e - 4; 2.4e - 4; 3.2e - 2\}$  вероятность исправного состояния канала составила

$P_{\text{ИСК}} = \{0.378; 0.34; 0.039\}$ . Среднее значение вероятности исправного состояния канала составило:  $\overline{P_{\text{ИСК}}} = 0.7417$ ;  $\sigma_{p.\text{иск}} = 0.251$  (таблица В.2.2; приложение В.2).

Разработанный метод оценки надежности канала позволяет определить величину готовности канала к передаче кадров с заданной надежностью. В результате имитационного моделирования каждым узлом  $n_i \in N$  для каждого отношения соседства получены оценки надежности физических каналов  $e_{y.c.i} \in E_{y.c}$ , прогнозируемые оценки исправного состояния каналов  $\{P_{\text{ИСК}i}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{e.y.c.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{e.y.c.i}\}$  каналов для каждого периода  $[t_i, t_i + T_{\text{ООС}}]$ . Средние значения интенсивностей отказов и восстановлений, определенные узлом  $n_1$  при получении кадров от узла  $n_0$  в физическом канале  $e_{y.c.1} \in E_{y.c}$  (таблица В.2.2; приложение В.2), составили соответственно:

- $\overline{\lambda_{e.y.c.1}} = 0.0056$ ;  $\sigma_{\lambda.e.y.c.1} = 0.0072$ ;
- $\overline{\mu_{e.y.c.1}} = 0.1651$ ;  $\sigma_{\mu.e.y.c.1} = 0.4996$ .

Таким образом, в ходе имитационного моделирования продолжительностью  $t = 10^4$ с. на основе взаимодействия смежных узлов для каждого канала связи каждым узлом коммуникационной системы были определены последовательности показателей качества: вероятности ошибки элемента сигнала и соответствующие им вероятности надежного приема дискретного сообщения относительно заданного порогового значения. Применяя к полученным последовательностям механизм интерполяции методом наименьших квадратов в скользящем окне, каждым узлом для каждого отношения соседства определены прогнозируемые на период обновления отношений соседства показатели качества каналов связи: вероятности исправного состояния канала, интенсивности их отказов и восстановлений. Так, среднее значение вероятности исправного состояния канала составило:  $\overline{P_{\text{ИСК}}} = 0.7417$  ( $\sigma_{p.\text{иск}} = 0.251$ ). Полученные показатели надежности являются составляющими оценок надежности сред установления соединения и передачи данных.

### 4.3. Формирование трассы установления соединения

В имитационной модели, исследуемой коммуникационной системы «Эстафета», реализован протокол передачи данных в среде установления соединения (разделы 2.3) с конкурентным синхронным механизмом доступа узлов к среде. Находясь в свободном состоянии каждый узел прослушивает каналы  $e_{y.c.i} \in E_{y.c}$ , где канал  $e_{y.c.i}$  в момент времени  $t_i$  является активным в соответствии с моделью процесса установления соединения (раздел 2.3). В ходе прослушивания узлы выполняют прием и обработку кадров, передаваемых соседними узлами. В результате обработки узлы осуществляют сбор, накопление и обработку

статистических данных каждой пары соседних узлов  $\{s, k\} \in N$  в течение периода  $T_{00c}$ . В результате имитационного моделирования каждый узлом в течение времени моделирования  $t = 10^4$ с. для каждого отношения соседства были получены последовательности оценок надежности физических каналов  $e_{yc.i} \in E_{yc}$ , прогнозируемые оценки исправного состояния каналов  $\{P_{иски}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{e.yc.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{e.yc.i}\}$  каналов для каждого периода  $[t_i, t_i + T_{00c}]$ .

В соответствии с разработанной моделью линии передачи данных (разделы 3.2, 3.7) на полученных данных о качестве принимаемых дискретных сообщений узлами формируются оценки надежности  $\{CUC_i\}$  для каждого отношения соседства, поддерживаемых каждым узлом (раздел 3.4.1). В результате каждым узлом определяются последовательности оценок надежности  $\{CUC_i\}$ , которые включают коэффициент готовности  $\{F_{CUC.i}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{CUC.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{CUC.i}\}$  для каждого отношения соседства.

На основе полученных оценок надежности  $\{CUC_i\}$  и в соответствии с разработанной моделью (раздел 3.4.2) каждым узлом для каждого отношения соседства формируется трассы установления соединения. На основе созданного метода (раздел 3.4.2) узлами определяются оценки надежности трассы установления соединения. В результате каждым узлом определяются последовательности оценок надежности  $\{TUC_i\}$ , которые включают коэффициент готовности  $\{F_{TUC.i}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{TUC.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{TUC.i}\}$  для каждого отношения соседства.

#### 4.3.1. Исследование показателей надежности среды установления соединения

В имитационной модели исследуемой коммуникационной системы среда установления соединения образована заданным физическим каналом  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  и инцидентными ему узлами  $\{s, k\}$ , выполняющими обмен данными в соответствии с протоколом установления соединения (раздел 2.3). Надежность среды установления соединения определяется методом, указанным в разделе 3.4.1 каждым узлом на основе полученных интенсивностей отказов  $\{\lambda_{e.yc.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{e.yc.i}\}$  физических каналов для каждого периода  $[t_i, t_i + T_{00c}]$  (раздел 4.2) [108].

В ходе работы каждый узел определяет величину периода  $T_{00c}$  и начало его отсчета для каждого отношения соседства. Величина периода  $T_{00c}$  является переменной величиной. Действующее значение текущего периода вычисляется на момент выполнения процедуры обновления отношений соседства разницей временных меток:

$$T_{00c} = t_{00c.i} - t_{00c.i-1}, \quad (4.3.1.1)$$

где  $t_{00c.i}$  – временная метка начала текущего обновления отношений соседства;  $t_{00c.i-1}$  – временная метка начала предыдущего обновления отношений соседства. Определение действующего значения периода  $T_{00c}$  приведено в приложении В.3.

В ходе имитационного моделирования была выполнена серия экспериментов, длительностью  $T_{exp} = 10^4$  секунд каждый. В течение  $T_{exp}$  узлы выполняли:

- инициализацию,
- подключение к среде установления соединения,
- обнаружение соседних узлов,
- установление и поддержку отношений соседства,
- создание базы данных соседних узлов,
- обмен данными,
- сбор статистических данных,
- определение качественных характеристик физических каналов.

В таблице В.3.1 (приложение В.3) приведены статистические данные качества сигналов, принимаемых узлами  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2} \in E_{yc}$ , полученные за период измерения  $T_{exp} = 10^4$ с.

В ходе моделирования каждый узел при выполнении процедуры обновления отношений соседства с каждым соседним узлом на основе собранных, за период  $T_{00c}$ , статистических данных и принятой модели среды установления соединения (раздел 3.4.1) выполнял расчет коэффициента готовности  $F_{Cyc}$  (3.4.1.6), интенсивностей отказов  $\lambda_{Cyc}$  (3.4.1.7) и восстановлений  $\mu_{Cyc}$  (3.4.1.11)  $Cyc_i$  в каждом физическом канале  $e_{yc.i} \in E_{yc}$  для каждого соседского отношения. В таблицах В.3.2, В.3.3 (приложение В.3) приведены значения параметров надежности взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2} \in E_{yc}$ , полученные за период измерения  $T_{exp} = 10^4$ с (раздел 4.2), принятые в качестве исходных данных для моделирования надежности среды установления соединения.

Таким образом, в результате моделирования каждым узлом для каждого отношения соседства получены значения коэффициента готовности  $F_{Cyc}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{Cyc}$  (3.4.1.7) и восстановлений  $\mu_{Cyc}$  среды установления соединения каждого канала  $e_{yc.i} \in E_{yc}$ . На рисунке 4.3.1.1 показаны изменения коэффициента готовности среды установления соединения  $F_{Cyc.2}$ , образованной физическим каналом  $e_{yc.2} \in E_{yc}$  между соседними узлами  $\{n0, n1\}$ . Численные значения коэффициента готовности, интенсивности отказов и восстановлений  $Cyc_2$  узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2}$ , полученные за период измерения  $T_{exp} = 10^4$ с, приведены в таблице В.3.4 (приложение В.3). Для каждого периода  $[t_i, t_i + T_{00c}]$  узлами  $\{n0, n1\}$

определены интенсивности отказов  $\lambda_{СУС.2}$  (3.4.1.6) и восстановлений  $\mu_{СУС.2}$  (3.4.1.10)  $СУС_2$ . Полученные численные результаты приведены в таблице В.3.4 (приложение В.3).

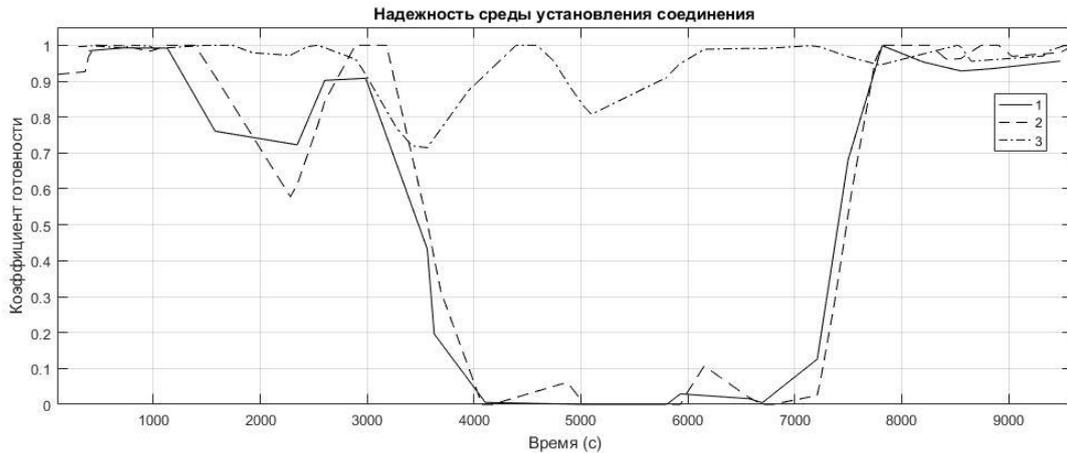


Рисунок 4.3.1.1 Коэффициент готовности среды установления соединения (1) физического канала  $e_{УС.2} \in E_{УС}$ ; (2, 3) состояние физической среды на входах узлов  $n0$  и  $n1$  соответственно

Анализ полученных результатов показывает, что надежность среды установления соединения не превышает надежность элементов, входящих в её состав, что объясняется последовательным соединением элементов. Так средние вероятности исправного состояния физического канала  $e_{УС.2} \in E_{УС}$ , определенные соседними узлами  $\{n0, n1\}$ , при взаимном приеме кадров соответственно составили  $\overline{P_{иск.2}^{01}} = 0.644$ ;  $\overline{P_{иск.2}^{10}} = 0.947$  при среднеквадратических отклонениях  $\sigma_{иск.2}^{01} = 0.42$ ;  $\sigma_{иск.2}^{10} = 0.079$  (таблица В.3.3; приложение В.3). При этом среднее значение коэффициента готовности  $СУС_2$  составило  $\overline{F_{СУС.2}} = 0.569$  при среднеквадратическом отклонении  $\sigma_{F.СУС.2} = 0.426$  (таблица В.3.5; приложение В.3).

Отказом среды установления соединения в соответствии с принятой моделью (разделы 2.3; 3.4.1) считается потеря передаваемого кадра или его прием с достоверностью ниже допустимой. Отказ любого из элементов среды влечет за собой отказ всей системы её переход в состояние восстановления. Так, в ходе моделирования получен отказ канала  $e_{УС.2} \in E_{УС}$  на интервале времени  $t = (4104.6 \div 7371)$ с. (таблица В.3.1; приложение В.3) в виде снижение качества сигнала, принимаемого узлом  $n0$  от узла  $n1$ , ниже допустимого  $p_{ош.i} < p_{ош.доп} = 5 * 10^{-4}$ , что привело  $СУС_2$  между узлами  $\{n0, n1\}$  к переходу в состояние восстановления.

Таким образом, в ходе моделирования каждым узлом для каждого отношения соседства на основе каналов связи формировались среды установления соединения, являющиеся элементами трасс установления соединения. В результате анализа полученных результатов моделирования установлено, что надежность сред установления соединения не превышает надежности любого из её элементов. Так, на примере взаимодействия узлов  $n0$  и  $n1$  в канале  $e_{УС.2}$  средний показатель коэффициента готовности среды установления соединения составил

$\overline{F_{СУС.2}} = 0.57$  ( $\sigma_{F.СУС.2} = 0.43$ ), вероятности исправного состояния канала  $e_{УС.2}$ , определенные узлами  $n_0$  и  $n_1$  соответственно составили  $\overline{P_{иск.2}^{01}} = 0.64$  и  $\overline{P_{иск.2}^{10}} = 0.95$  ( $\sigma_{иск.2}^{01} = 0.42$ ;  $\sigma_{иск.2}^{10} = 0.08$ ). Полученные результаты показывают, что использование нерезервированной системы в условиях длительных замираний сигнала не обеспечивает непрерывность информационного обмена. Полученные показатели надежности среды установления соединения  $F_{СУС}, \lambda_{СУС}, \mu_{СУС}$  позволяют определить надежность трассы установления соединения.

#### 4.3.2. Анализ показателей надежности трассы установления соединения

В ходе математического (раздел 3.4.1) и имитационного (4.3.1) моделирования было доказано, что использование отдельных физических каналов  $e_{УС.i} \in E_{УС}$  для организации обмена данными узлов исследуемой коммуникационной системы не позволяют обеспечить требуемый уровень качества и надежности. Для увеличения надежности обмена данными взаимодействие между соседними узлами выполняется средствами трассы установления соединения (раздел 3.4.2).

В соответствии с разработанной моделью (раздел 3.4.2) трасса установления соединения есть восстанавливаемая система с резервированием методом замещения, элементами которой являются  $\{СУС_i\}$  (разделы 3.4.1, 4.3.1). Формирование трассы установления соединения и определение её надежности в ходе имитационного моделирования длительностью  $T_{exp} = 10^4$  секунд выполнялось в соответствии с предложенным в разделе 3.4.2. методом с периодом  $T_{оос}$  (4.3.1.1), где исходными данными являлись показатели надежности: коэффициент готовности  $\{F_{СУС.i}\}$  (таблица В.4.1, В.4.2, приложение В.4), интенсивности отказов  $\{\lambda_{СУС.i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{СУС.i}\}$  (таблица В.4.3, приложение В.4) сред установления соединения  $\{СУС_i\}$  пары соседних узлов  $\{s, k\}$ .

Момент возникновения требования установления соединения является случайной величиной. Количество попыток для установления соединения также является случайной величиной. Кроме того, алгоритм (раздел 2.3) предусматривает использование случайных интервалов отсрочки при выполнении попыток установления соединения. Все вышесказанное не позволяет заранее определить список и порядок использования каналов  $\{e_{УС.i}\} \in E_{УС}$ , необходимых для формирования трассы установления соединения. В имитационной модели сделано допущение, что для формирования трассы установления соединения используются  $\{СУС_i\}$ , где  $i = 1 \div r$  с усредненными на множестве каналов  $\{e_{УС.i}\} \in E_{УС}$  показателями надежности: коэффициенте готовности  $\overline{F_{СУС}}$ , интенсивности отказов  $\overline{\lambda_{СУС}}$  и восстановлений  $\overline{\mu_{СУС}}$ .

В результате имитационного моделирования каждым узлом для каждого отношения соседства получены значения коэффициентов готовностей  $F_{\text{ТУС}}$ , интенсивностей отказов  $\lambda_{\text{СУС}}$  и восстановлений  $\mu_{\text{СУС}}$  трасс установления соединения. На рисунке 4.3.2.1 показаны изменения коэффициентов готовности сред установления соединения  $\{F_{\text{СУС}0-7}\}$  (а-з) и зависимость коэффициента готовности  $F_{\text{ТУС}}$  трассы установления соединения (и) узлов  $\{n0, n1\}$ , полученная в ходе имитационного моделирования при различных значениях количества повторных попыток. Численные результаты моделирования: значения коэффициента готовности  $\{F_{\text{ТУС}i}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{\text{ТУС}i}\}$  и восстановлений  $\{\mu_{\text{ТУС}i}\}$  полученные в ходе взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  приведены в таблицах В.4.4, В.4.5, В.4.6 (приложение В.4).

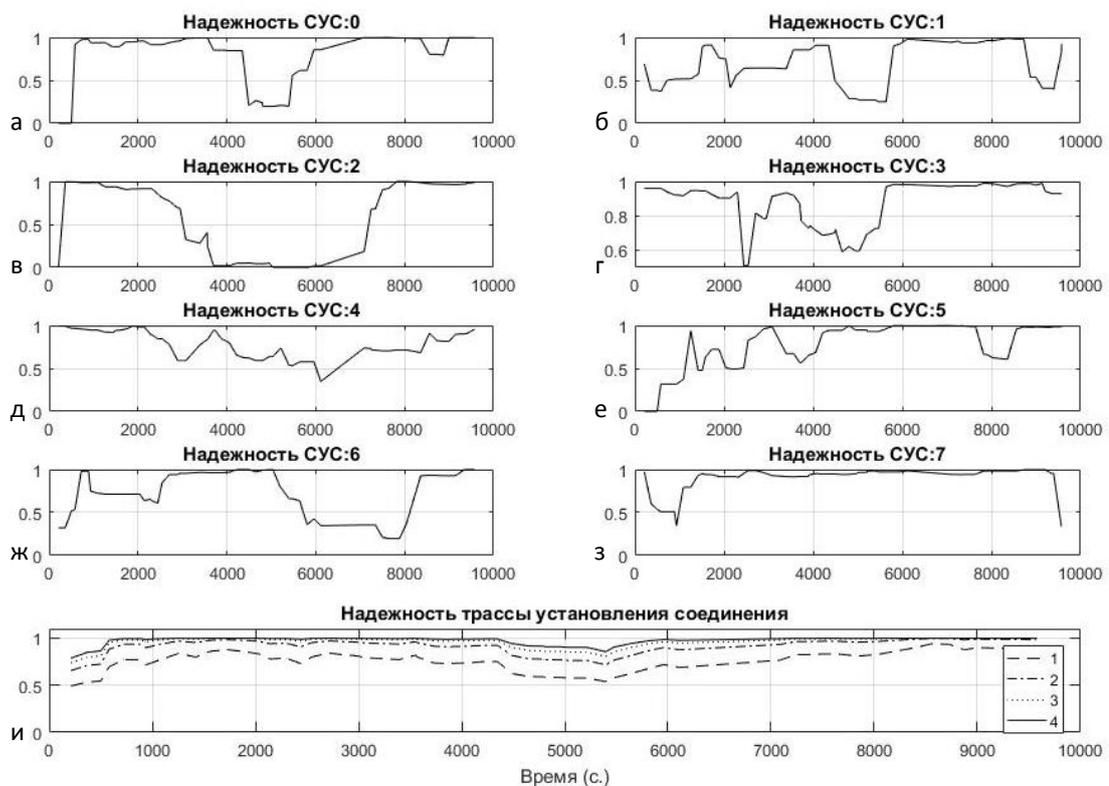


Рисунок 4.3.2.1 Коэффициент готовности трассы установления соединения узлов  $\{n0, n1\}$ : (и); количество повторных попыток: 1, 2, 3, 4 (и:1, 2, 3, 4); (а-з): коэффициенты готовности сред установления соединения  $\{\text{СУС}_{0-7}\}$

Анализ полученных результатов показывает, что трасса установления соединения обеспечивает выполнение операции установления соединения между любыми соседними пространственно-разнесенными узлами с надежностью значительно превышающей надежность отдельных сред установления соединения вне зависимости от условий распространения и приема сигналов в отдельных каналах. Так, средние значения коэффициентов готовности  $\{\text{СУС}_{0-7}\}$  узлов  $\{n0, n1\}$  составили:

$$\overline{F_{\text{СУС}0-7}} = \{0.7866; 0.6614; 0.5861; 0.8676; 0.7938; 0.7514; 0.7481; 0.8944\} \text{ при}$$

$\sigma_{F_{\text{СУС.0-7}}} = \{0.3049; 0.2463; 0.4316; 0.1339; 0.1505; 0.2701; 0.2682; 0.1603\}$ , где значения медианы составили соответственно:

$$Me_{F_{\text{СУС.0-7}}} = \{0.9157; 0.6434; 0.8796; 0.9289; 0.8296; 0.9225; 0.8185; 0.9441\}.$$

В тоже время коэффициенты готовности трассы установления соединения между узлами  $\{n_0, n_1\}$  при допустимом количестве повторных попыток (количестве используемых каналов)  $r = \{1, 2, 3, \dots, 8\}$  составили:

$$\overline{F_{\text{ТУС.1-8}}} = \{0.7612; 0.912; 0.9573; 0.975; 0.9836; 0.977; 0.9546; 0.8768\}$$
 при

$\sigma_{F_{\text{ТУС.1-8}}} = \{0.1112; 0.0845; 0.0604; 0.0444; 0.034; 0.117; 0.1979; 0.3285\}$ , где значения медианы составили соответственно:

$$Me_{F_{\text{ТУС.1-8}}} = \{0.7856; 0.9447; 0.9851; 0.996; 0.9989; 0.9997; 0.9999; 0.9999\}.$$

Снижение среднего значения коэффициента готовности трассы установления соединения при  $r = \{6, 7, 8\}$  связано отсутствием оценок надежности некоторых сред установления соединения в отдельные моменты времени, что объясняется случайностью процессов возникновения требований обслуживания, флуктуацией параметров среды распространения сигналов, а также наличием помех в среде передачи данных, приводящих к потере передаваемых кадров управления, в том числе кадров Hello.

Таким образом, в соответствии с предложенной блочно-иерархической структурой каждый узел для каждого отношения соседства формировал трассы установления соединения, элементами которых являются среды установления соединения. Анализ результатов имитационного моделирования показал, что применение трасс установления соединения обеспечивает требуемый уровень качества командного взаимодействия соседних узлов в условиях нестационарности каналов связи, значительных различий показателей качества каналов на входах разнесенных узлов, действия длительных замираний. Так, при взаимодействии узлов  $(n_0, n_1)$ , среднее значение коэффициента готовности трассы установления соединения составило  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.98$  ( $\sigma_{F_{\text{ТУС}}} = 0.04$ ) при допустимом количестве попыток/каналов  $r = 4$ . При этом средние значения коэффициентов готовности сред установления соединения составили  $\overline{F_{\text{СУС}}} = \{0.79; 0.66; 0.59; 0.87; 0.79; 0.75; 0.75; 0.89\}$ ,  $\sigma_{F_{\text{СУС}}} = \{0.3; 0.25; 0.43; 0.13; 0.15; 0.27; 0.27; 0.16\}$ . Получены показатели надежности трассы установления соединения: коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений. Полученные показатели надежности трассы установления соединения: коэффициент готовности  $F_{\text{ТУС}}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{\text{ТУС}}$  и восстановлений  $\mu_{\text{ТУС}}$  являются составляющими показателей надежности линии передачи данных.

#### 4.4. Анализ показателей надежности узла следующего перехода

Готовность узла коммуникационной системы к обработке запросов обмена данными определяется готовностью его модуля доступа к выполнению обмена данными. В имитационной модели готовность узла следующего перехода определялась на основе анализа статистических данных о количестве поступивших, обработанных и отказанных запросов передачи данных. Обмен статистическими данными между соседними узлами осуществлялся в ходе выполнения процедуры обновления отношений соседства (раздел 2.5).

Для определения интенсивности поступления запросов передачи данных в модуль управления узла использовалось следующее выражение:

$$w_{зпд}(t) = \frac{N_{зпд}(t)}{t}, \quad (4.4.1)$$

где  $N_{зпд}$  – количество поступивших запросов передачи данных за период обновления отношений соседства  $t = T_{оос}$  (2.5.7). Источниками поступления запросов обмена данными являются: соседние узлы, выбравшие текущий узел в качестве узла следующего перехода (назначения), а также модули уровня приложений текущего узла, генерирующие запросы обмена данными с другими узлами сети. Обработка поступившего запроса передачи данных выполняется в соответствии с принятыми базовыми алгоритмами (разделы 2.4.1, 2.4.2).

Начиная с момента перехода модуля доступа к среде передачи данных из состояния «свободен» в состояния, соответствующие этапам подготовки к передаче данных и передачи данных непосредственно, текущий узел будет отвечать отказами на запросы обмена данными. В имитационной модели готовность узла определялась в каждом периоде  $[t_i, t_i + T_{оос}]$ . Для каждой пары узлов период  $T_{оос}$  определяется исходя из задаваемого на момент начала работы модели значения, состояния среды установления соединения, готовности соседних узлов, выполняемой при соединении роли.

В ходе выполнения имитационного моделирования [112] надежность узла оценивалась по коэффициенту его готовности (3.5.3). Процедура обработки запроса передачи данных состоит из нескольких этапов:

- установления соединения,
- подготовки передачи данных,
- передачи данных.

В соответствии с принятыми базовыми алгоритмами передачи данных в средах установления соединения и передачи данных (разделы 2.3, 2.4) узел, участвующий в соединении может выполнять роли «лидер» или «ведомый». Длительность процедуры установления соединения в режиме «лидер»  $T_{ус}$  определяется выражением (2.3.4). В имитационной модели длительность процедуры установления соединения в режиме «лидер» измеряется от момента начала обработки узлом запроса передачи данных и его выхода из

свободного состояния до момента получения кадра подтверждения, переданного ведомым узлом в среде установления соединения.

Длительность установления соединения в режиме «ведомый»  $T_{yc}$  также является случайной величиной и зависит от вероятности успешного приема кадра подтверждения вызова вызывающим узлом. Длительность процедуры установления соединения в режиме «ведомый» измеряется от момента получения ведомым узлом кадра запроса передачи данных, передаваемых лидером в среде установления соединения, до момента получения ведомым узлом кадра запроса соединения, передаваемого лидером в среде передачи данных.

В ходе работы имитационной модели узлы выполни подсчет среднего времени установления соединения  $T_{yc,cp}$  за каждый период обновления отношений соседства  $T_{оос}$ . Этапы подготовки и передачи данных (разделы 2.4.1, 2.4.2) объединены в подсчет среднего времени передачи данных  $T_{пд,ср}$ . Для определения интенсивности обработки запросов передачи данных  $\mu_{зпд}$  в ходе моделирования использовалось выражение (3.5.2).

Для вычисления среднего времени установления соединения в имитационной модели использовалось следующее выражение:

$$\overline{T_{yc,ср}}(t) = \frac{\sum T_{yc,л}(t) + \sum T_{yc,в}(t)}{N_{зпд,л}(t) + N_{зпд,в}(t)}. \quad (4.4.2)$$

где  $T_{yc,л}$  – время процедуры установления соединения при обработке запроса передачи данных в режиме «лидер»;  $T_{yc,в}$  – время процедуры установления соединения при обработке запроса передачи данных в режиме «ведомый»;  $N_{зпд,л}$  – количество запросов передачи данных в режиме «лидер»;  $N_{зпд,в}$  – количество требований передачи данных в режиме «ведомый»;  $t = T_{оос.i}$ .

Среднее время передачи данных в ходе имитационного моделирования определялось на основе отношения суммарного времени обработки запросов передачи данных к числу запросов передачи данных, обработанных за  $T_{оос}$ :

$$\overline{T_{пд}}(t) = \frac{\sum_j T_{пд,j}(t)}{N_{зпд}(t)}, \quad (4.4.3)$$

где  $T_{пд,j}$  – длительность  $i$ -й передачи данных;  $t = T_{оос.i}$ ;  $N_{зпд}$  – количество запросов передачи данных. В ходе моделирования  $\sum_j T_{пд,j}$  определялось суммированием всех временных интервалов процесса передачи данных (в ролях «лидер» или «ведомый»).

Тогда, с учетом изменений, внесенных в (3.5.2), получено выражение для интенсивности восстановления узла следующего перехода:

$$\mu_{зпд}(t) = \frac{1}{\overline{T_{yc,ср}}(t) + \overline{T_{пд}}(t)}, \quad (4.4.4)$$

Для вычисления коэффициента готовности узла следующего перехода получено выражение:

$$F_{\text{усп}}(t) = \frac{1}{1 + \frac{w_{\text{зпд}}(t)}{\mu_{\text{зпд}}(t)}} \quad (4.4.5)$$

Исходные данные, принятые для проведения имитационного моделирования надежности узла следующего перехода приведены в приложении В.5. В результате моделирования получены зависимости коэффициента готовности  $F_{\text{усп}}$ , интенсивности запросов и восстановлений узла следующего перехода. Зависимость коэффициента готовности узла следующего перехода от интенсивности поступления запросов передачи данных  $w_{\text{зпд}}$  показана на рисунке 4.4.1. Зависимостями 1, 2, 3 (рисунок 4.4.1) показаны изменения коэффициентов готовности  $F_{\text{усп}}$  соответствующих узлов следующего перехода, определенных текущим узлом, при изменениях интенсивностей запросов передачи данных  $w_{\text{зпд}}$ . Численные результаты имитационного моделирования приведены в таблице В.5.1 (приложение В.5).

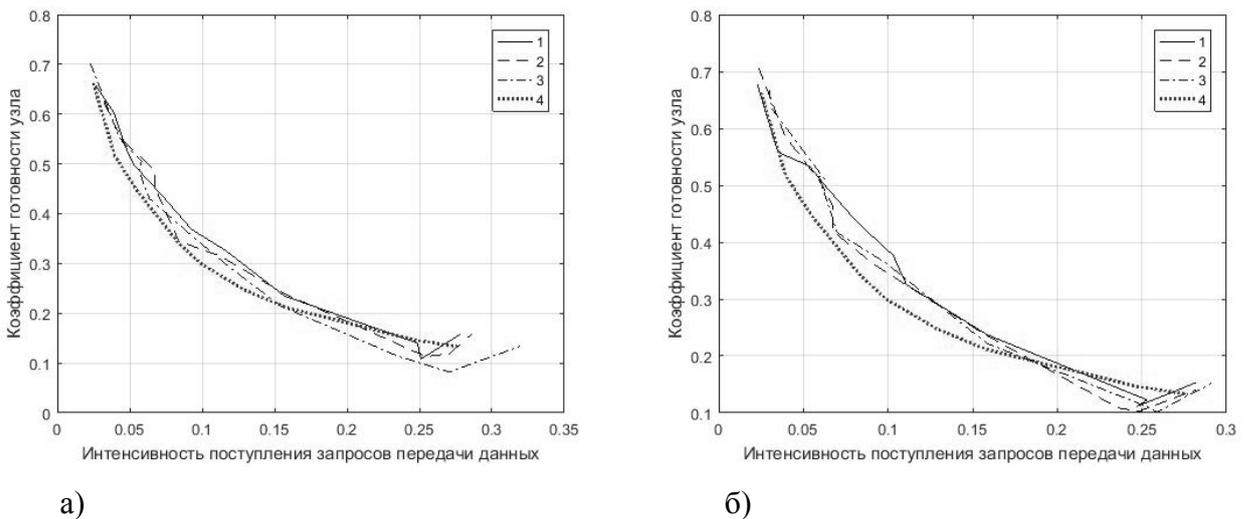


Рисунок 4.4.1 Коэффициенты готовности узлов следующего перехода, определенные узлом:

- а)  $n_0$  для соседних узлов:  $n_1$  (1);  $n_2$  (2);  $n_3$  (3);
- б)  $n_1$  для соседних узлов:  $n_0$  (1);  $n_2$  (2);  $n_3$  (3);
- (4) - коэффициент готовности узла следующего перехода, полученный в ходе математического моделирования

Анализ полученных результатов показывает, что требования обмена данными обрабатываются узлами после прохождения среды установления соединения. Для доступа к среде установления соединения узлы используют конкурентный доступ (раздел 2.3). Следовательно, рост интенсивности потока данных в среде установления соединения, приводит к увеличению конфликтов и потере части запросов. Максимальное значение интенсивности  $w_{\text{зпд}}$ , достигнутое в ходе экспериментов, составило  $w_{\text{зпд}} \leq 0.3$ . Дальнейшее увеличение  $w_{\text{зпд}}$  ограничено ростом конфликтов в среде.

Таким образом, узел следующего перехода обеспечивает продвижение передаваемых данных по выбранному маршруту от узла источника к узлу назначения. Рост интенсивности трафика в среде установления соединения, приводит к увеличению конфликтов и потере части передаваемых запросов установления соединения. Так, в ходе моделирования коэффициент готовности узла n1 составил  $F_{УСП,n1} = 0,66$  при интенсивности запросов передачи данных  $w_{зпд,n0} = 0,03$ . При увеличении интенсивности запросов  $w_{зпд,n0} = 0,25$  получено снижение коэффициента готовности узла следующего перехода  $F_{УСП,n1} = 0,11$ . Наблюдаются скачкообразные изменения коэффициентов надежности при  $w_{зпд} \approx 0,25$ , что объясняется нестабильным состоянием среды установления соединения при большом количестве конфликтов (интерференций). Полученные показатели надежности: коэффициент готовности  $F_{УСП}$ , интенсивности поступления требований обмена данными  $w_{зпд}$  и восстановлений  $\mu_{УСП}$  узла следующего перехода является составляющей весовой оценки линии передачи данных.

#### 4.5. Формирование трассы передачи данных

В ходе взаимодействия в среде установления соединения каждый узел исследуемой коммуникационной системы выполняет сбор и обработку статистических данных качества принимаемых от соседних узлов сигналов (раздел 3.3) и формирует оценки надежности физических каналов  $e_{пд,i} \in E_{пд}$  на период времени  $[t_i, t_i + T_{ООС}]$ . Полученные оценки позволяют определить для каждого соседнего узла множество каналов, обладающих наилучшими показателями надежности и использовать их для обмена данными в среде передачи данных. Использование отдельных каналов  $e_{пд,i} \in E_{пд}$  для передачи данных потенциально ограничивает длительность периода исправного состояния линии передачи данных величиной периода квазистационарности  $T_{КСК}$  физического канала.

В имитационной модели для увеличения надежности обмена данными формируются интерфейсы, элементами которых являются каналы  $e_{пд,i} \in E_{пд}$ , образуя резервированную восстанавливаемую систему. Интерфейсы формируются каждым узлом для каждого отношения соседства. Совокупность интерфейсов, используемых парой соседних узлов для взаимного обмена данными, образует трассу передачи данных. В соответствии с разработанной моделью (разделы 3.2, 3.6, 3.6.1, 3.6.2) трасса передачи данных образована интерфейсами узлов  $\{s, k\}$ . Интерфейсы состоят из группы каналов  $e_{и,i} \in E_{и} \in E_{пд}$ , для которых выполняется условие надежности канала передачи данных (3.6.1.10), отсортированных в порядке убывания вероятности исправного состояния канала передачи данных  $P_{ИСК.пд}$ . Полученные оценки надежности трассы передачи данных, являются элементами линии передачи данных.

#### 4.5.1. Исследование показателей надежности интерфейса узла

На основе, полученных в результате имитационного моделирования, статистических данных и в соответствии с принципами, изложенными в разделе 3.6.1, каждый узел для каждого отношения соседства с периодом  $T_{00c}$  (2.5.7) формирует (обновляет) интерфейсы передачи данных. Для этого выполняется отбор каналов, удовлетворяющих требованию надежности (3.6.1.10). Отобранные каналы составляют множество вероятных интерфейсных каналов  $e_{и.и} \in E_{и} \in E_{пд}$ . Каналы, входящие в множество  $E_{и}$ , сортируются в порядке убывания оценки их надежности  $P_{иск.пд}$  (раздел 4.2). Для выполнения имитационного моделирования количество каналов, составляющих множество  $E_{и}$ , было выбрано равным:

$$n_{и} = 4. \quad (4.5.1.1)$$

Каналы  $\{e_{пд.и}\} \in E_{пд}$ , не вошедшие в множество  $E_{и}$ , используются для поиска замещающих каналов в случае отказов интерфейсных каналов  $\{e_{и.и}\} \in E_{и}$ .

Определение надежности интерфейсов узлов выполняется в соответствии с моделью, представленной в разделе 3.6.1 [114]. Для построения интерфейса соседние узлы в ходе поддержки отношений соседства устанавливают соединение и обмениваются результатами обработки собранных статистических данных.

В ходе имитационного моделирования каждый узел формировал интерфейсы для каждого отношения соседства. Обновление интерфейсов выполняется с периодом  $T_{00c,д}$  – действующего в имитационной модели, периода обновления отношений соседства:

$$T_{00c,д} = T_{00c} + \Delta t, \quad (4.5.1.2)$$

где  $\Delta t$  – случайная задержка, вызванная обработкой очередей требований обслуживания канального уровня, а также случайной величиной отсрочки момента начала попытки выполнения процедуры обновления отношений соседства.

В соответствии с разработанной моделью (раздел 3.6.1) интерфейс узла представляет собой восстанавливаемую систему с резервированием замещением. Надежность интерфейсов оценивается коэффициентом готовности  $F_{и}$  (раздел 3.6.1), интенсивностями отказов  $\lambda_{и}$  и восстановлений  $\mu_{и}$ .

В результате имитационного моделирования каждым узлом коммуникационной системы для каждого отношения соседства получены зависимости коэффициентов готовности  $F_{и}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{и}$  и восстановлений  $\mu_{и}$  интерфейсов передачи данных узлов коммуникационной системы. Так, на рисунке 4.5.1.1 показаны изменения коэффициента готовности интерфейса  $F_{и}$  узла  $n0$  с узлом  $n1$  (зависимость 1) на интервале имитационного моделирования  $T_{exp} = 10^4$  секунд. Количество повторных попыток передачи кадров данных в

отдельном физическом канале  $e_{и.и} \in E_{и}$  для моделирования было выбрано равным  $r = 1$ . Тогда, отказ канала  $e_{и.и} \in E_{и}$  определяется после первой неудачной попытки передачи кадра данных. Увеличение количества попыток передачи кадров приводит к росту надежности интерфейсов и трассы передачи данных (разделы 3.6.1, 3.6.2). Изменения вероятностей исправного состояния каналов передачи данных показаны зависимостями (2 – 9). Численные результаты имитационного моделирования надежности интерфейсов приведены в таблицах В.6.1, В.6.2 (приложение В.6).

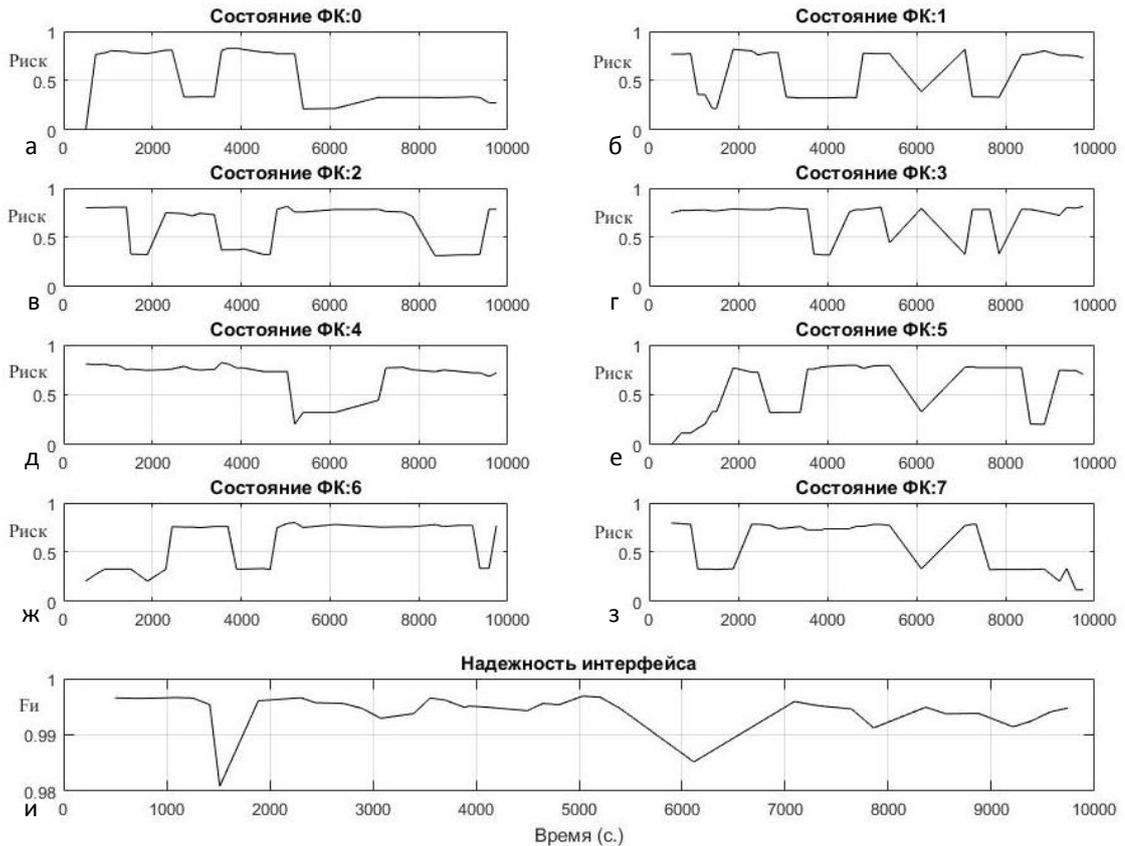


Рисунок 4.5.1.1 Коэффициент готовности  $I_{01}$  узла  $n_0$  с узлом  $n_1$ : (и); (а-з): надежности каналов передачи данных  $\{P_{\text{Риск.пд.0-7}}\}$

Анализ полученных результатов показывает, что сетевой интерфейс сохраняет относительную стабильность при нестационарности каналов, входящих в его состав. Длительность периода квазистационарности интерфейса превышает длительности периодов квазистационарности физических каналов (рисунок 4.5.1.1), являющихся его элементами. Надежность интерфейса превышает надежность каналов  $\{e_{и.и}\} \in E_{и}$ , входящих в его состав. Так, полученные средние значения составили:

- коэффициента готовности интерфейса:  $\overline{F_{и.01}} = 0,994$  при  $\sigma_{F_{и.01}} = 0,0031$ ;
- вероятности исправного состояния каналов

$$P_{\text{Риск.пд.0-7}} = \{0,884; 0,839; 0,89; 0,907; 0,9; 0,841; 0,834; 0,81\} \text{ при}$$

$$\sigma_{\text{иск.пд.0-7}} = \{0,116; 0,109; 0,061; 0,042; 0,05; 0,159; 0,138; 0,161\}.$$

Следовательно, применение интерфейсов позволяет создать слабо зависимую от физической среды систему передачи данных. Используя зависимость (3.6.1.22), были получены значения интенсивностей возникновения отказов сетевых интерфейсов  $\lambda_{\text{и}}$ . В таблице В.6.3, В.6.4 (приложение В.6) приведены интенсивности отказов интерфейсов ( $I_{01}$ ,  $I_{10}$ ) узлов ( $n_0$ ,  $n_1$ ), полученные в ходе моделирования. Интенсивность восстановления интерфейса  $\mu_{\text{и}}$ , находящегося в пассивном состоянии, определялась в соответствии с выражением (3.6.1.18).

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что сетевой интерфейс сохраняет относительную стабильность при нестационарности каналов, входящих в его состав. Надежность интерфейса превышает надежность каналов передачи данных, являющихся его элементами. Так, на примере взаимодействия узлов  $n_0$ ,  $n_1$  среднее значение коэффициента готовности интерфейса узла  $n_0$  составило  $\overline{F_{\text{и.01}}} = 0,99$  ( $\sigma_{F_{\text{и.01}}} = 0,003$ ) при средних значениях вероятностей исправного состояния каналов передачи данных  $R_{\text{иск.пд.0-7}} = \{0,88; 0,84; 0,89; 0,91; 0,90; 0,84; 0,83; 0,81\}$  ( $\sigma_{\text{иск.пд.0-7}} = \{0,12; 0,12; 0,06; 0,04; 0,05; 0,16; 0,14; 0,16\}$ ). Применение интерфейсов позволяет создать слабо зависимую от физической среды систему передачи данных. Полученные показатели надежности интерфейса: коэффициент готовности  $F_{\text{и}}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{\text{и}}$  и восстановлений  $\mu_{\text{и}}$ , являются составляющими функции надежности трассы передачи данных.

#### 4.5.2. Анализ показателей надежности трассы передачи данных

Трасса передачи данных формируется между соседними узлами  $\{s, k\}$  для выполнения обмена данными средствами их интерфейсов  $\{I_{sk}, I_{ks}\}$  (раздел 3.6.2). В соответствии с моделью надежности (раздел 3.6.2), трасса передачи данных есть восстанавливаемая система с основным (последовательным) соединением элементов.

В ходе имитационного моделирования, каждым узлом для каждого отношения соседства формировались трассы передачи данных. Так, соседними узлами  $\{n_0, n_1\}$ , на основе интерфейсов  $\{I_{01}, I_{10}\}$ , была образована ТПД<sub>01</sub>. Коэффициент готовности ТПД<sub>01</sub> определялся каждым узлом  $\{n_0, n_1\}$  в ходе выполнения процедуры обновления отношения соседства с периодом  $T_{\text{оос}}$  (4.5.1.2). Для этого, указанным в разделах (3.6.1, 4.5.1) методом, определялись:

- коэффициенты готовности  $\{F_{\text{и.01}}, F_{\text{и.10}}\}$  (3.6.1.16) интерфейсов  $\{I_{01}, I_{10}\}$ ,
- их интенсивности отказов  $\{\lambda_{\text{и.01}}, \lambda_{\text{и.10}}\}$  (3.6.1.22) и восстановлений  $\{\mu_{\text{и.01}}, \mu_{\text{и.10}}\}$  (3.6.1.18).

На основе полученных показателей надежности интерфейсов при каждом обновлении отношений соседства выполнялось вычисление коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД}}$ . (3.6.2.5).

Длительность работы имитационной модели составила  $T_{\text{exp}} = 10^4$  секунд. Для каждого события обновления отношений соседства узлом  $n0$  выполнялся расчет надежности  $F_{\text{ТПД},01}$  с узлом  $n1$ . Численные результаты имитационного моделирования приведены в таблице В.7.1 (приложение В.7). На рисунке 4.5.2.1 показана зависимость коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД},01}$ , полученная в ходе имитационного моделирования в зависимости от состояния интерфейсов  $\{I_{01}, I_{10}\}$ .

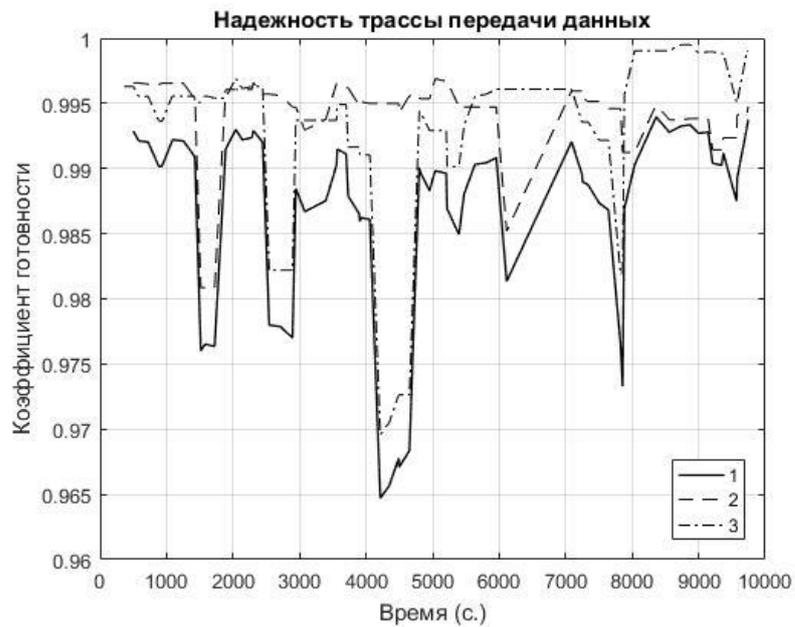


Рисунок 4.5.2.1 Коэффициент готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД},01}$  (1); коэффициенты готовности интерфейсов  $F_{I_{01}}, F_{I_{10}}$  узлов  $n0, n1$  (2, 3)

Зависимость коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД},01}$  показаны зависимостью 1 на рисунке 4.5.2.1. Изменения коэффициентов готовности интерфейсов показаны зависимостями 2 и 3 на рисунке 4.5.2.1.

Анализ полученных в ходе моделирования результатов показывает, что надежность трассы передачи данных снижается по отношению к надежности, составляющих её интерфейсов, т.к. трасса передачи данных представляет собой систему с последовательным соединением элементов. Средние значения коэффициентов готовности трассы передачи данных ( $\overline{F_{\text{ТПД},01}}$ ), интерфейсов  $\{I_{01}, I_{10}\}$  ( $\overline{F_{I_{01}}}, \overline{F_{I_{10}}}$ ), полученные в ходе работы имитационной модели, приведены в таблице 4.5.2.1.

Таблица 4.5.2.1 Средние значения: коэффициента готовности ( $\overline{F_{\text{ТПД.01}}}$ ), интенсивностей отказов ( $\overline{\lambda_{\text{ТПД.01}}}$ ) и восстановлений ( $\overline{\mu_{\text{ТПД.01}}}$ ) трассы передачи данных ТПД<sub>01</sub> узлов  $n_0, n_1$ ; средние значения коэффициентов готовности ( $\overline{F_{\text{И.01}}}, \overline{F_{\text{И.10}}}$ ) интерфейсов И<sub>01</sub>, И<sub>10</sub> узлов  $n_0, n_1$

$\overline{F_{\text{ТПД.01}}}$	$\overline{\lambda_{\text{ТПД.01}}}$	$\overline{\mu_{\text{ТПД.01}}}$	$\overline{F_{\text{И.01}}}$	$\overline{F_{\text{И.10}}}$
0,9871	0,0107	0,9695	0,9943	0,9928

Полученные значения показывают, что надежность трассы передачи данных значительно превышает надежность каналов  $e_{\text{ПД.}i} \in E_{\text{ПД}}$ , составляющих интерфейсы узлов. Так, среднее значение коэффициента готовности, определенное узлом  $n_0$  составило:  $\overline{F_{\text{ТПД.01}}} = 0,9871$  (таблица 4.5.2.1) при  $\sigma_{\text{ТПД.01}} = 0,0074$  (таблица 4.5.2.2).

Средние вероятности исправного состояния каналов передачи данных (0 – 7) составили  $\overline{P_{\text{ИСК.ПД.0-7}}} = \{0,884; 0,839; 0,89; 0,907; 0,9; 0,841; 0,834; 0,81\}$  при  $\sigma_{0-7} = \{0,116; 0,109; 0,061; 0,042; 0,05; 0,159; 0,138; 0,161\}$ .

Таблица 4.5.2.2 Значения среднеквадратического отклонения: коэффициента готовности ( $\sigma_{F_{\text{ТПД.01}}}$ ), интенсивностей отказов ( $\sigma_{\lambda_{\text{ТПД.01}}}$ ) и восстановлений ( $\sigma_{\mu_{\text{ТПД.01}}}$ ) трассы передачи данных ТПД<sub>01</sub> узлов  $n_0, n_1$ ; значения среднеквадратического отклонения коэффициентов готовности ( $\sigma_{F_{\text{И.01}}}, \sigma_{F_{\text{И.10}}}$ ) интерфейсов И<sub>01</sub>, И<sub>10</sub> узлов  $n_0, n_1$

$\sigma_{F_{\text{ТПД.01}}}$	$\sigma_{\lambda_{\text{ТПД.01}}}$	$\sigma_{\mu_{\text{ТПД.01}}}$	$\sigma_{F_{\text{И.01}}}$	$\sigma_{F_{\text{И.10}}}$
0,0074	0,0046	0,4675	0,0033	0,007

Полученное среднее значение коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД.01}} = 0,9871$  при стандартном отклонении  $\sigma_{\text{ТПД.01}} = 0,0074$ , что превышает пороговое значение допустимой вероятности исправного состояния физического канала передачи данных  $P_{\text{ИСК.доп.}} = 0,5$  (3.6.1.10) на всем интервале имитационного моделирования  $T_{\text{exp}} = 10^4$  секунд при значительных колебаниях вероятностей исправного состояния каналов, составляющих интерфейсы. Так, в ходе работы модели было определено суммарное время нахождения каналов передачи данных ( $e_{\text{ПД.0}} - e_{\text{ПД.7}}$ ) (таблица 4.5.2.3), составляющих интерфейс узла  $n_0$ , в состоянии восстановления, где не выполняется условие (3.6.1.10).

Таблица 4.5.2.3 Суммарное время восстановления ( $T_{\text{в.}}$ ) каналов передачи данных ( $e_{\text{ПД.0}} - e_{\text{ПД.7}}$ ), составляющих интерфейс И<sub>01</sub>

В секундах							
$T_{\text{в.0}}$	$T_{\text{в.1}}$	$T_{\text{в.2}}$	$T_{\text{в.3}}$	$T_{\text{в.4}}$	$T_{\text{в.5}}$	$T_{\text{в.6}}$	$T_{\text{в.7}}$
5490,4	3822,4	3241,6	4076,8	2052,8	3193,6	3124,8	4076,8

Таким образом, в результате имитационного моделирования исследуемой коммуникационной системы на основе векторов статистических данных надежности интерфейсов узлов получены оценки надежности трассы передачи данных. Полученные

результаты подтверждают устойчивое состояние трассы передачи данных, при нестационарности физических каналов, входящих в состав интерфейсов. Полученные результаты моделирования позволяют расценивать трассу передачи данных как квазистационарную систему на интервале моделирования  $T_{exp} = 10^4$  секунд.

В соответствии с предложенной блочно-иерархической структурой каждый узел для каждого отношения соседства формировал трассы передачи данных, элементами которых являются интерфейсы узлов. Анализ результатов имитационного моделирования показал, что надежность трассы передачи данных снижается по отношению к надежности, составляющих её интерфейсов, однако, значительно превышает надежность каналов передачи данных. Так, на примере взаимодействия узлов n0, n1 среднее значение коэффициента готовности трассы передачи данных составило  $\overline{F_{ТПД.01}} = 0,99$  ( $\sigma_{ТПД.01} = 0,007$ ), средние значения интерфейсов узлов n0 и n1 составили  $\overline{F_{И.01}} = 0,994$  и  $\overline{F_{И.10}} = 0,992$  соответственно, средние вероятности справногo состояния каналов составили  $\overline{P_{ИСК.ПД.0-7}} = \{0,88; 0,84; 0,89; 0,91; 0,9; 0,84; 0,83; 0,81\}$  ( $\sigma_{ИСК.ПД.0-7} = \{0,116; 0,109; 0,061; 0,042; 0,05; 0,159; 0,138; 0,161\}$ ). Полученные показатели надежности трассы передачи данных: коэффициент готовности  $F_{ТПД}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{ТПД}$  и восстановлений  $\mu_{ТПД}$  являются составляющими функции надежности линии передачи данных.

#### 4.6. Формирование линии передачи данных и анализ показателей её надежности

В соответствии с предложенной в разделе 3.2 базовой структурой, линия передачи данных  $l_{sk}$  есть восстанавливаемая система с последовательным соединением элементов:

- трассы установления соединения;
- узла следующего перехода;
- трассы передачи данных.

Отказ любого из элементов приводит к отказу линии передачи данных в целом. Модели функционирования и методы оценки надежности элементов линии приведены в разделах 3.4.2, 3.5, 3.6.2.

В ходе имитационного моделирования каждый узел на основе оценок надежности физических каналов и готовности узлов к передаче данных для каждого отношения соседства методом агрегирования формировал элементы линии передачи данных и вычислял показатели их надежности (разделы 4.3.2, 4.4, 4.5.2). Получаемые в ходе моделирования, значения интенсивностей отказов и восстановлений элементов позволили каждому узлу сформировать с

каждым соседним узлом линии передачи данных, обеспечивающие обмен данными в условиях нестационарности физических каналов.

Используя положения разработанной модели линии передачи данных (раздел 3.7) и результаты имитационного моделирования: трассы установления соединения, узла следующего перехода и трассы передачи данных, были сформированы линии и получены коэффициенты их готовности. Так в ходе взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  была сформирована линия передачи данных  $l_{01}$ . В ходе имитационного моделирования, длительностью  $T_{exp} = 10^4$  секунд, для каждого события обновления отношений соседства узлом  $n0$  выполнялось определение коэффициента готовности  $F_{ЛПД,01}$  линии  $l_{01}$  с узлом  $n1$ . В результате получена зависимость коэффициента готовности  $F_{ЛПД,01}$  линии  $l_{01}$  (рисунок 4.6.1) от:

- надежности трассы установления соединения  $F_{ТУС,01}(\lambda_{ТУС,01}, \mu_{ТУС,01})$ ;
- готовности узла следующего перехода  $F_{УСП,1}(\lambda_{УСП,1}, \mu_{УСП,1})$ ;
- надежности трассы передачи данных  $F_{ТПД,01}(\lambda_{ТПД,01}, \mu_{ТПД,01})$ .

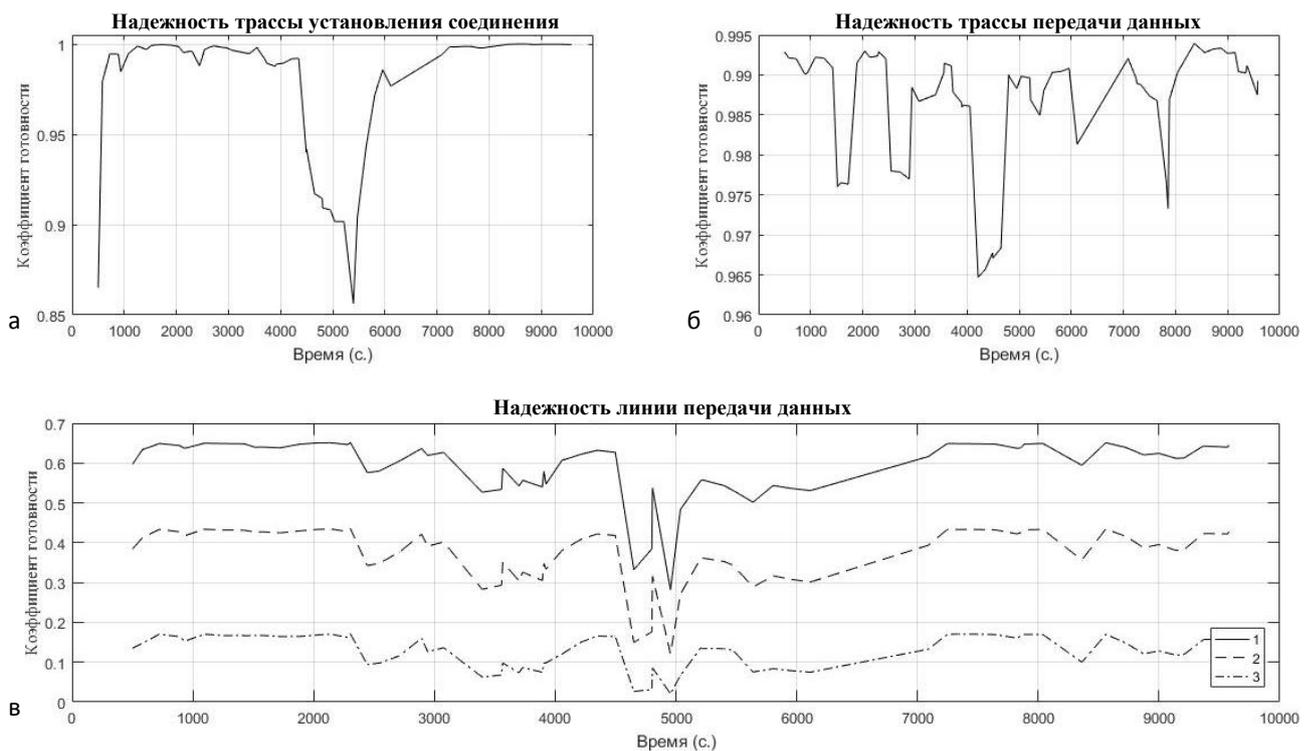


Рисунок 4.6.1 Коэффициент готовности линии передачи данных узлов  $\{n0, n1\}$  (в), где коэффициент готовности узла следующего перехода  $F_{УСП,1} = 0.6579$  (в: 1); 0.4403 (в: 2); 0.1081 (в: 3); (а) – коэффициент готовности трассы установления соединения  $F_{ТУС,01}$ ; (б) – коэффициент готовности трассы передачи данных  $F_{ТПД,01}$

В качестве условия выполнения моделирования принято, что коэффициент готовности  $F_{УСП}$  (интенсивности отказов  $\lambda_{УСП}$  и восстановлений  $\mu_{УСП}$ ) узла следующего перехода принимается постоянным на всем интервале моделирования  $T_{exp} = 10^4$ с.. Для моделирования

линии  $l_{01}$  использовались значения коэффициента готовности  $F_{усп.1}$  (интенсивности отказов  $\lambda_{усп.1}$  и восстановлений  $\mu_{усп.1}$ ) узла следующего перехода –  $n1$ , определенные узлом  $n0$  (таблица В.5.1) в экспериментах 1, 5, 10, где  $F_{усп.1} = 0.6579; 0.4403; 0.1081$ . В результате имитационного моделирования в течение  $T_{exp} = 10^4$  секунд получен коэффициент готовности  $F_{лпд.01}$  линии  $l_{01}$ , который показан зависимостями (в: 1, в: 2, в: 3) на рисунке 4.6.1. Численные результаты имитационного моделирования приведены в таблице В.8.1, В.8.2 (приложение В.8).

Анализ полученных результатов показывает, что надежность линии передачи данных не превышает надежности, составляющих её элементов, т.к. линия представляет собой систему с последовательным соединением. Наибольшее влияние на значение коэффициента готовности линии передачи данных оказывает коэффициент готовности узла следующего перехода. Для увеличения надежности узла следует снижать интенсивность поступления запросов передачи данных и (или) уменьшить размер передаваемых данных.

Положим, что оценка длительностей периодов исправного состояния и состояния восстановления линии передачи данных выполнялась относительно заданного допустимого значения коэффициента готовности  $F_{лпд.доп} = 0.5$ . Тогда, линия (зависимость в: 1, рисунок 4.6.1) на интервалах времени:

- $t = \{[0 \div 4651.495]; [5205.095 \div 10000]\}$  секунд находится в исправном состоянии  $F_{лпд.01} > F_{лпд.доп}$ .
- $t = [4651.495 \div 5205.095]$  секунд линия находится в состоянии восстановления после отказа  $F_{лпд.01} < F_{лпд.доп}$ .

Данное состояние интерпретируется узлом как событие изменения топологии коммуникационной системы, что повлечет за собой предусмотренные протоколом маршрутизации действия по корректировке таблиц маршрутизации. Полученные значения периодов исправного состояния линии передачи данных превышают периоды исправного состояния отдельных физических каналов.

Полученные средние значения коэффициента готовности линии передачи данных при различных фиксированных значениях готовности узла следующего перехода приведены в таблице 4.6.1. Среднеквадратические отклонения коэффициента готовности линии передачи данных, полученные в результате моделирования линии приведены в таблице 4.6.2.

Таблица 4.6.1 Коэффициент готовности линии передачи данных ( $\overline{F_{лпд.01}}$ ) узлов  $n0, n1$  при различных фиксированных значениях готовности узла следующего перехода ( $F_{усп.1}$ ) узла  $n1$  и заданных значения коэффициентов готовности трасс установления соединения ( $\overline{F_{тус.01}}$ ) и передачи данных ( $\overline{F_{тпд.01}}$ )

$\overline{F_{\text{ЛПД.01}}}$			$\overline{F_{\text{ТУС.01}}}$	$\overline{F_{\text{ТПД.01}}}$
$F_{\text{УСП.1}} = 0.6579$	$F_{\text{УСП.1}} = 0.4403$	$F_{\text{УСП.1}} = 0.1081$		
0,5974	0,3794	0,1319	0,9791	0,9868

Таблица 4.6.2 Среднеквадратическое отклонение коэффициента готовности линии передачи данных ( $\sigma_{F.\text{ЛПД.01}}$ ) узлов ( $n_0, n_1$ ) при различных фиксированных значениях готовности узла следующего перехода ( $F_{\text{УСП.1}}$ ) узла  $n_1$  и заданных значений среднеквадратических отклонений коэффициентов готовности трасс установления соединения ( $\sigma_{F.\text{ТУС.01}}$ ) и передачи данных ( $\sigma_{F.\text{ТПД.01}}$ )

$\sigma_{F.\text{ЛПД.01}}$			$\sigma_{F.\text{ТУС.01}}$	$\sigma_{F.\text{ТПД.01}}$
$F_{\text{УСП.1}} = 0.6579$	$F_{\text{УСП.1}} = 0.4403$	$F_{\text{УСП.1}} = 0.1081$		
0,0723	0,0684	0,041	0,0361	0,0074

Таким образом, в соответствии с разработанной блочно-иерархической схемой каждый узел для каждого отношения соседства в ходе взаимодействия формировал линии передачи данных, элементами которых являются: трассы установления соединения и передачи данных и узел следующего перехода. Так, на примере взаимодействия узлов  $n_0, n_1$  в результате имитационного моделирования получено:

- организация линии передачи данных как системы позволяет в значительной мере снизить влияние нестационарности отдельных каналов связи на надежность и непрерывность информационного обмена, так линия передачи данных поддерживает исправное состояние в течении  $t = 9446,4$ с. что составляет 94,5% времени работы модели;
- надежность линии передачи данных слабо зависит от нестационарности параметров физических каналов и различий в условиях приема сигналов разнесенных узлов, так средние значения трасс установления соединения передачи данных в составе линии передачи данных соответственно равны  $\overline{F_{\text{ТУС.01}}} = 0,979$ ,  $\overline{F_{\text{ТПД.01}}} = 0,986$ ;
- наибольшее влияние на показатель надежности линии передачи данных оказывает интенсивность потоков данных, проходящих через узел следующего перехода в составе линии передачи данных, так среднее значение коэффициента готовности линии передачи данных составило  $\overline{F_{\text{ЛПД.01}}} = 0,597$  при  $\overline{F_{\text{ТУС.01}}} = 0,979$ ,  $F_{\text{УСП.1}} = 0.658$ ,  $\overline{F_{\text{ТПД.01}}} = 0,986$ .

Полученные показатели надежности: коэффициент готовности  $F_{\text{ЛПД}}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{\text{ЛПД}}$  и восстановлений  $\mu_{\text{ЛПД}}$  линии передачи данных являются составляющими функции надежности маршрута передачи данных.

#### 4.7. Определение основного и альтернативных маршрутов доставки сообщений, оптимизированных по критерию надежности

В ходе имитационного моделирования исследуемой коммуникационной системы каждым узлом системы были получены значения коэффициентов готовности линий передачи данных, соединяющих его с соседними узлами. На рисунке 4.7.1 показана схема линий передач данных, сформированных узлом  $n0$  с соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$  в ходе имитационного моделирования.

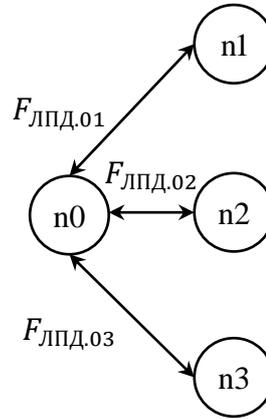


Рисунок 4.7.1 Схема линий передач данных, сформированных узлом  $n0$  с соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$

В таблице 4.7.1 приведены коэффициенты готовности линий передач данных между узлом  $n0$  и соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$ , определенные узлом  $n0$  в ходе их формирования.

Таблица 4.7.1 – Коэффициенты готовности линий передачи данных ( $F_{ЛПД.}$ ) узла  $n0$  с соседними узлами  $n1, n2, n3$

$F_{ЛПД.01}$	$F_{ЛПД.02}$	$F_{ЛПД.03}$
0,5974	0,4416	0,5568

Положим, что в соответствии с топологией коммуникационной системы, представленной на рисунке 4.7.2, каждый из узлов  $\{n1, n2, n3\}$  имеет маршрут передачи данных до некоторого узла назначения  $nd$ . Коэффициенты готовности маршрутов передачи данных от узлов следующего перехода  $\{n1, n2, n3\}$  до узла назначения  $nd$  приведены в таблице 4.7.2.

Таблица 4.7.2 – Коэффициенты готовности маршрутов доставки сообщений ( $F_{R.}$ ) от узлов  $\{n1, n2, n3\}$  до узла назначения  $nd$

$F_{R.1d}$	$F_{R.2d}$	$F_{R.3d}$
0,3952	0,29	0,3109

При диффузном распространения маршрутной информации, узел  $n0$  получает от соседних узлов  $n1, n2, n3$  значения метрик сообщенных маршрутов передачи данных до узла назначения  $nd$ . Значение метрики каждого сообщенного маршрута есть агрегированная оценка надежности последовательного соединения всех линий передачи данных, составляющих маршрут, от узла сообщающего о наличии маршрута, до узла назначения. На рисунке 4.7.2

представлена топология коммуникационной системы, определенная узлом  $n0$  по средствам обмена информацией с соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$ .

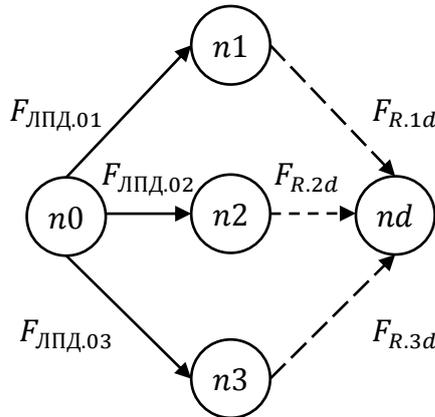


Рисунок 4.7.2 Топология коммуникационной системы, определенная узлом  $n0$  по средствам обмена информацией с соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$

Получив, значения метрик сообщенных маршрутов  $\{F_{R.1d}, F_{R.2d}, F_{R.3d}\}$  (таблица 4.7.2), узел  $n0$ , используя определенные коэффициенты готовности линий передачи данных  $\{F_{ЛПД.01}, F_{ЛПД.02}, F_{ЛПД.03}\}$  (таблица 4.7.1) и выражение (3.1.7), вычисляет значения метрик вероятных маршрутов передачи данных до удаленного узла  $nd$ , проходящих через узлы следующего перехода:  $\{n1, n2, n3\}$ . Полученные оценки надежности вероятных маршрутов передачи данных от узла источника  $n0$  до узла назначения  $nd$  приведены в таблице 4.7.3.

Таблица 4.7.3 Коэффициенты готовности вероятных маршрутов передачи данных ( $F_R$ ) от узла  $n0$  до узла  $nd$ , проходящие через узлы следующего перехода:  $\{n1, n2, n3\}$

$F_{R.01d}$	$F_{R.02d}$	$F_{R.03d}$
0,2361	0,1281	0,1731

Определение текущего маршрута передачи данных до узла назначения  $nd$  выполняется узлом  $n0$ , путем выбора вероятного маршрута с наибольшим значением коэффициента готовности. Маршрут, проходящий через узел следующего перехода  $n1$ , соответствует условию (3.1.8)  $F_{R.01d} = 0.2361$ . Следовательно, маршрут от узла источника  $n0$  до узла назначения  $nd$ , проходящий через узел следующего перехода  $n1$ , выбирается в качестве основного маршрута. Маршруты от узла  $n0$  до узла  $nd$ , проходящие через узлы следующего перехода  $n2, n3$  с метриками  $\{0,1281; 0,1731\}$  становятся резервными.

Таким образом, в результате применения разработанных методов каждым узлом коммуникационной системы сформированы возможные маршруты доставки сообщений конечным абонентам оптимизированные по критерию надежности. Так, на примере взаимодействия узлов  $\{n0, n1, n2, n3\}$  сформированы возможные маршруты доставки сообщений от узла источника  $n0$  до узла назначения  $nd$  через промежуточные узлы

$\{n_1, n_2, n_3\}$ . Для каждого маршрута на основе применения разработанного метода получены оценки его надежности, которые составили соответственно  $\{0.24; 0.13; 0.17\}$ . В качестве критерия оценки использован коэффициент готовности, определяющий условную непрерывности информационного обмена в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений. В результате выбора определен основной маршрут доставки сообщений с коэффициентом готовности  $F_{R,01d} = 0.24$ . Альтернативные маршруты имеют коэффициенты готовности  $\{0.17; 0.13\}$ .

Использование мер нацеленных на достижение квазистационарности топологии системы при нестационарности физических каналов позволило сформировать маршруты передачи данных, с периодом наработки на отказ превышающим периоды исправной работы отдельных физических каналов. Это дает возможность применять проактивные методы формирования маршрутов передачи данных, обеспечивающих минимальное время подготовки информационного обмена после получения требования обслуживания.

#### 4.8. Выводы по главе 4

1. 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. В основе имитационной модели реализована модель нестационарных каналов связи с аддитивной помехой в виде нормального шума. Разработка модели коммуникационной системы выполнена на базе системы дискретного моделирования событий “OMNeT++” с подключенной библиотекой моделей для проводных, беспроводных и мобильных сетей “INET”.
2. В ходе имитационного моделирования продолжительностью  $t = 10^4$ с. на основе взаимодействия смежных узлов для каждого канала связи каждым узлом коммуникационной системы были определены последовательности показателей качества: вероятности ошибки элемента сигнала и соответствующие им вероятности надежного приема дискретного сообщения относительно заданного порогового значения. Применяя к полученным последовательностям механизм интерполяции методом наименьших квадратов в скользящем окне, каждым узлом для каждого отношения соседства определены прогнозируемые на период обновления отношений соседства показатели качества каналов связи: вероятности исправного состояния канала, интенсивности их отказов и

- восстановлений. Так, среднее значение вероятности исправного состояния канала составило:  $\overline{P_{\text{иск}}} = 0.7417$  ( $\sigma_{p.\text{иск}} = 0.251$ ).
3. В ходе моделирования каждым узлом для каждого отношения соседства на основе каналов связи формировались среды установления соединения, являющиеся элементами трасс установления соединения. В результате анализа полученных результатов моделирования установлено, что надежность сред установления соединения не превышает надежности любого из её элементов. Так, на примере взаимодействия узлов  $n_0$  и  $n_1$  в канале  $e_{\text{УС.2}}$  средний показатель коэффициента готовности среды установления соединения составил  $\overline{F_{\text{СУС.2}}} = 0.57$  ( $\sigma_{F.\text{СУС.2}} = 0.43$ ), вероятности исправного состояния канала  $e_{\text{УС.2}}$ , определенные узлами  $n_0$  и  $n_1$  соответственно составили  $\overline{P_{\text{иск.2}}^{01}} = 0.64$  и  $\overline{P_{\text{иск.2}}^{10}} = 0.95$  ( $\sigma_{\text{иск.2}}^{01} = 0.42$ ;  $\sigma_{\text{иск.2}}^{10} = 0.08$ ). Полученные результаты показывают, что использование нерезервированной системы в условиях длительных замираний сигнала не обеспечивает непрерывность информационного обмена.
  4. В соответствии с предложенной блочно-иерархической структурой каждый узел для каждого отношения соседства формировал трассы установления соединения, элементами которых являются среды установления соединения. Анализ результатов имитационного моделирования показал, что применение трасс установления соединения обеспечивает требуемый уровень качества командного взаимодействия соседних узлов в условиях нестационарности каналов связи, значительных различий показателей качества каналов на входах разнесенных узлов, действия длительных замираний. Так, при взаимодействии узлов ( $n_0, n_1$ ), среднее значение коэффициента готовности трассы установления соединения составило  $\overline{F_{\text{ТУС}}} = 0.98$  ( $\sigma_{F.\text{ТУС}} = 0.04$ ) при допустимом количестве попыток/каналов  $r = 4$ . При этом средние значения коэффициентов готовности сред установления соединения составили  $\overline{F_{\text{СУС}}} = \{0.79; 0.66; 0.59; 0.87; 0.79; 0.75; 0.75; 0.89\}$ ,  $\sigma_{F.\text{СУС}} = \{0.3; 0.25; 0.43; 0.13; 0.15; 0.27; 0.27; 0.16\}$ . Получены показатели надежности трассы установления соединения: коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений.
  5. Узел следующего перехода обеспечивает продвижение передаваемых данных по выбранному маршруту от узла источника к узлу назначения. Рост интенсивности трафика в среде установления соединения, приводит к увеличению конфликтов и потере части передаваемых запросов установления соединения. Так, в ходе моделирования коэффициент готовности узла  $n_1$  составил  $F_{\text{УСП.}n_1} = 0,66$  при интенсивности запросов передачи данных  $w_{\text{ЗПД.}n_0} = 0.03$ . С ростом интенсивности запросов  $w_{\text{ЗПД.}n_0} = 0.25$  получено снижение

коэффициента готовности узла следующего перехода  $F_{усп.n1} = 0,11$ . Наблюдаются скачкообразные изменения коэффициентов надежности при  $w_{зпд} \approx 0,25$ , что объясняется нестабильным состоянием среды установления соединения при большом количестве конфликтов (интерференций). Полученные показатели надежности: коэффициент готовности, интенсивности поступления требований обмена данными и восстановлений узла следующего перехода является составляющими оценки надежности линии передачи данных.

6. Для реализации этапа обмена полезными данными каждым узлом для каждого отношения соседства в процессе моделирования формировались интерфейсы. Анализ полученных результатов показывает, что сетевой интерфейс сохраняет относительную стабильность при нестационарности каналов, входящих в его состав. Надежность интерфейса превышает надежность каналов передачи данных, являющихся его элементами. Так, на примере взаимодействия узлов  $n_0, n_1$  среднее значение коэффициента готовности интерфейса узла  $n_0$  составило  $\overline{F_{и.01}} = 0,99$  ( $\sigma_{F_{и.01}} = 0,003$ ) при средних значениях вероятностей исправного состояния каналов передачи данных

$$P_{иск.пд.0-7} = \{0,88; 0,84; 0,89; 0,91; 0,90; 0,84; 0,83; 0,81\}$$

( $\sigma_{иск.пд.0-7} = \{0,12; 0,12; 0,06; 0,04; 0,05; 0,16; 0,14; 0,16\}$ ). Применение интерфейсов позволяет создать слабо зависимую от физической среды систему передачи данных. Полученные показатели надежности интерфейса: коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений являются составляющими функции надежности трассы передачи данных.

7. В соответствии с предложенной блочно-иерархической структурой каждый узел для каждого отношения соседства формировал трассы передачи данных, элементами которых являются интерфейсы узлов. Анализ результатов имитационного моделирования показал, что надежность трассы передачи данных снижается по отношению к надежности, составляющих её интерфейсов, однако, значительно превышает надежность каналов передачи данных. Так, на примере взаимодействия узлов  $n_0, n_1$  среднее значение коэффициента готовности трассы передачи данных составило  $\overline{F_{тпд.01}} = 0,99$  ( $\sigma_{тпд.01} = 0,007$ ), средние значения интерфейсов узлов  $n_0$  и  $n_1$  составили  $\overline{F_{и.01}} = 0,994$  и  $\overline{F_{и.10}} = 0,992$  соответственно, средние вероятности исправного состояния каналов составили

$$\overline{P_{иск.пд.0-7}} = \{0,88; 0,84; 0,89; 0,91; 0,9; 0,84; 0,83; 0,81\}$$

$\sigma_{\text{иск.лпд.0-7}} = \{0,116; 0,109; 0,061; 0,042; 0,05; 0,159; 0,138; 0,161\}$ . Полученные показатели надежности трассы передачи данных: коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений являются составляющими функции надежности линии передачи данных.

8. В соответствии с разработанной блочно-иерархической схемой каждый узел для каждого отношения соседства в ходе взаимодействия формировал линии передачи данных, элементами которых являются: трассы установления соединения и передачи данных и узел следующего перехода. Так, на примере взаимодействия узлов  $n_0, n_1$  в результате имитационного моделирования получено:

- организация линии передачи данных как системы позволяет в значительной мере снизить влияние нестационарности отдельных каналов связи на надежность и непрерывность информационного обмена, так линия передачи данных поддерживает исправное состояние в течении  $t = 9446,4$ с. что составляет 94,5% времени работы модели;
- надежность линии передачи данных слабо зависит от нестационарности параметров физических каналов и различий в условиях приема сигналов разнесенных узлов, так средние значения трасс установления соединения передачи данных в составе линии передачи данных соответственно равны  $\overline{F_{\text{Тус.01}}} = 0,979$ ,  $\overline{F_{\text{Тпд.01}}} = 0,986$ ;
- наибольшее влияние на показатель надежности линии передачи данных оказывает интенсивность потоков данных, проходящих через узел следующего перехода в составе линии передачи данных, так среднее значение коэффициента готовности линии передачи данных составило  $\overline{F_{\text{лпд.01}}} = 0,597$  при  $\overline{F_{\text{Тус.01}}} = 0,979$ ,  $F_{\text{Усп.1}} = 0.658$ ,  $\overline{F_{\text{Тпд.01}}} = 0,986$ .

Полученные показатели надежности: коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений линии передачи данных являются составляющими функции надежности маршрута передачи данных.

9. В результате применения разработанных методов каждым узлом коммуникационной системы сформированы возможные маршруты доставки сообщений конечным абонентам оптимизированные по критерию надежности. Так, на примере взаимодействия узлов  $\{n_0, n_1, n_2, n_3\}$  сформированы возможные маршруты доставки сообщений от узла источника  $n_0$  до узла назначения  $n_d$  через промежуточные узлы  $\{n_1, n_2, n_3\}$ . Для каждого маршрута на основе применения разработанного метода получены оценки его надежности, которые составили соответственно  $\{0.24; 0.13; 0.17\}$ . В качестве критерия оценки использован коэффициент готовности, определяющий условную непрерывности информационного обмена в пространстве параметров надежности элементов, составляющих маршрут доставки сообщений. В результате выбора определен основной

маршрут доставки сообщений с коэффициентом готовности 0.24. Альтернативные маршруты имеют коэффициенты готовности {0.17; 0.13}.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 возможных маршрутов доставки сообщений конечному получателю в коммуникационной системе с нестационарной топологией, оптимизированных по критерию надежности в условиях нестационарности каналов связи.
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 СУС<sub>2</sub>, 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  $n_d$  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.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЗС – запрос соединения

И – интерфейс

КД – кадр данных

КУ – кадр управления

ЛПД – линия передачи данных

ПС – подтверждение соединения

ПД – передача данных

СУС – среда установления соединения

СПД – среда передачи данных

ТУС – трасса установления соединения

ТПД – трасса передачи данных

УСП – узел следующего перехода

$D$  – среднее количество узлов с задолженностью на начало слота среды установления соединения

$D$  – размер блока данных

$d$  – узел назначения

$E$  – множество физических каналов

$E_{УС}$  – подмножество каналов установления соединения

$E_{ПД}$  – множество каналов передачи данных

$E_{И}$  – множество каналов интерфейса

$e_{УС}$  – физический канала установления соединения

$e_{ПД}$  – физический канала передачи данных

$e_{И}$  – интерфейсный канал

$e_{ИВ}$  – вероятный интерфейсный канал

$F_R$  – коэффициента готовности маршрута доставки сообщений

$F_l$  – коэффициент готовности линии передачи данных

$F_{RR}$  – коэффициент готовности сообщенного маршрута

$F_{e.УС}$  – коэффициент готовности канала установления соединения

$F_{СУС}$  – коэффициент готовности среды установления соединения

$F_{ТУС}$  – коэффициент готовности трассы установления соединения

$F_{УСП}$  – коэффициент готовности узла следующего перехода

$F_{e.ПД}$  – коэффициент готовности канала передачи данных

$F_{И}$  – коэффициент готовности интерфейса

$F_{ТПД}$  – коэффициент трассы передачи данных готовности

$F_{ЛПД}$  – коэффициент готовности линии передачи данных

$F_R$  – коэффициент готовности (значение метрики) маршрута доставки сообщений

$F_{R.id}$  – коэффициент готовности (значение метрики) сообщенного маршрута

$f_{ТУС}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа трассы установления соединения

$f_{ТУС.в}$  – плотность распределения времени до восстановления трассы установления соединения

$f_{УСП}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа узла следующего перехода

$f_{ТПД}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа трассы передачи данных

$f_{ТПД.в}$  – плотность распределения времени до восстановления трассы передачи данных

$G$  – граф топологии коммуникационной системы

$h^2$  – коэффициент превышения по напряжению или коэффициент защиты

$h_0^2$  – коэффициент отношения средней энергии сигнала к спектральной плотности помехи на входе приемного устройства

$K_{ч.к.}$  – коэффициент чередования каналов при рассылке кадров объявлений

$L$  – множество линий передачи данных

$L_{кд}$  – размер кадра

$l_{i,j}$  – линия передачи данных

$\lambda_l$  – интенсивность отказов линии передачи данных

$\lambda_{RR}$  – интенсивность отказов сообщенного маршрута

$\lambda_{ТУС}$  – интенсивность отказов трассы установления соединения

$\lambda_{ЗПД}$  – интенсивность отказов запросов передачи данных

$\lambda_{ТПД}$  – интенсивность отказов трассы передачи данных

$\lambda_{е.УС}$  – интенсивность отказов канала установления соединения

$\lambda_{е.УС}$  – интенсивность отказов канала передачи данных

$\lambda_{СУС}$  – интенсивность отказов среды установления соединения

$\lambda_{е.ПД}$  – интенсивность отказов канала передачи данных

$\lambda_{СПД}$  – интенсивность отказов среды передачи данных

$\lambda_{И}$  – интенсивность отказов интерфейса

$\lambda_{ТПД}$  – интенсивность отказов трассы передачи данных

$\lambda_{ЛПД}$  – интенсивность отказов линии передачи данных

$M$  – множество соседних узлов

$Me_{F,СУС.}$  – медиана коэффициента готовности среды установления соединения

$Me_{F,ТУС.}$  – медиана коэффициента готовности трассы установления соединения

$\mu_l$  – интенсивность восстановления линии передачи данных

$\mu_{RR}$  – интенсивность восстановления сообщенного маршрута

$\mu_{ТУС}$  – интенсивность восстановления трассы установления соединения

$\mu_{УСП}$  – интенсивность восстановления узла передачи данных

$\mu_{ТПД}$  – интенсивность восстановления трассы передачи данных

$\mu_{е.УС}$  – интенсивность восстановления канала установления соединения

$\mu_{е.ПД}$  – интенсивность восстановления канала передачи данных

$\mu_{СПД}$  – интенсивность восстановления среды передачи данных

$\mu_{и}$  – интенсивность восстановления интерфейса

$\mu_{ТПД}$  – интенсивность восстановления трассы передачи данных

$\mu_{ЛПД}$  – интенсивность восстановления линии передачи данных

$\mu_{ЗПД}$  – интенсивность обработки запросов передачи данных

$N$  – множество узлов коммуникационной системы

$N_{к.УС}$  – количество каналов среды установления соединения

$n_{и}$  – количество интерфейсных каналов

$P_c$  – мощность сигнала

$P_{п}$  – мощность помехи

$P_{НПДС}$  – вероятность надежного приема дискретного сообщения

$P_{ИСК}$  – вероятность исправного состояния канала

$P_{ИСК,доп.}$  – допустимая вероятность исправного состояния канала

$P_{УПК}$  – вероятность успешной попытки передачи кадра

$P_{п.к.}$  – вероятность успешной передачи кадра данных

$P_{ИСК.ПД}$  – вероятность исправного состояния канала передачи данных

$p_{ош}$  – вероятность ошибки при приеме элемента сигнала на фоне нормальной стационарной помехи

$p_{ош,доп.}$  – допустимая вероятность ошибки при приеме элемента сигнала на фоне нормальной стационарной помехи

$p(s, i)$  – показатель условного расстояния между узлами  $s, i$

$Q_{инт}$  – средняя длительность интервалов между выбросами помех

- $q_3$  – вероятность повторной попытки узла в задолженном состоянии выполнить передачу кадра данных в текущем слоте
- $q_c$  – вероятность того, что узел, не имеющий задолженности, выполнит попытку передачи в текущем слоте
- $Q_c$  – вероятность того, что  $i$  узлов, не имеющих задолженности, в текущем слоте получают требование обслуживания
- $Q_3$  – вероятность того, что  $i$  узлов, имеющих задолженность выполнят попытку повторной передачи в текущем слоте
- $Q_{ПК}$  – вероятность неудачной передачи кадра данных (потери кадра)
- $R_{sd}$  – маршрут доставки сообщений от узла источника до узла назначения
- $r$  – количество попыток передачи данных
- $r$  – количество резервных каналов в составе интерфейсов
- $S$  – средний размер передаваемого блока данных
- $s$  – количество слотов канала установления соединения
- $s$  – узел источник
- $\sigma_z$  – среднеквадратическое отклонение отношения сигнал/помеха
- $\sigma_{НПДС}$  – среднеквадратическое отклонение вероятности надежного приема дискретного сообщения
- $\sigma_{иск}$  – среднеквадратическое отклонение вероятности исправного состояния канала
- $\sigma_{F_{CVC}}$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента готовности среды установления соединения
- $\sigma_{иск.пд}$  – среднеквадратическое отклонение вероятности исправного состояния канала передачи данных
- $\sigma_{F.и}$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента готовности интерфейса
- $\sigma_{F.тус}$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента готовности трассы установления соединения
- $\sigma_{F.тпд}$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента готовности трассы передачи данных
- $\sigma_{\lambda.тпд}$  – среднеквадратическое отклонение интенсивности отказов трассы передачи данных
- $\sigma_{\mu.тпд}$  – среднеквадратическое отклонение интенсивности восстановления трассы передачи данных
- $\sigma_{p.ош}$  – среднеквадратическое отклонение вероятности ошибки при приеме элемента сигнала на фоне нормальной стационарной помехи
- $\sigma_{F.лпд}$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента готовности линии передачи данных

- $T_{\Pi}$  – длительность выброса помехи  
 $T_K$  – периода активности канала  
 $T_{сл.СУС}$  – длительность слота среды установления соединения  
 $T_{кадр.СУС}$  – длительность кадра среды установления соединения  
 $T_{тр.УС}$  – длительность транзакции установления соединения  
 $T_{УС}$  – время выполнения индивидуального вызова  
 $T_{ЗУС}$  – задержка установления соединения  
 $T_{з.СУС}$  – время задержки передачи кадра данных в среде установления соединения  
 $T_{ЗУС}$  – время задержки индивидуального вызова  
 $T_{сл.СПД}$  – длительность слота среды передачи данных  
 $T_{ОН}$  – время обнаружения несущей  
 $T_{ППП}$  – время переключения физического уровня с передачи на прием  
 $T_{РС}$  – время распространения сигнала  
 $T_{ММИ}$  – минимальный межкадровый интервал  
 $T_{ОПК}$  – задержка физического уровня при приеме кадра и передаче его на MAC уровень  
 $T_{ФК}$  – задержка формирования кадра  
 $T_{ППД}$  – длительность транзакции подготовки передачи данных  
 $T_{КУ.СПД}$  – длительность кадра управления среды передачи данных  
 $T_{н.к.ПД}$  – время настройки на канал передачи данных  
 $T_{о.д.СПД}$  – время ожидания передачи данных  
 $T_{о.д.СПД}$  – время ожидания кадра управления или данных ведомым узлом  
 $T_{о.ПС}$  – время ожидает лидером поступления кадра подтверждения соединения от ведомого узла  
 $T_{о.ЗС}$  – время ожидания ведомым кадра запроса соединения от лидера после выполнения настройки на выбранный канал среды передачи данных  
 $T_{тр.у.СПД}$  – длительность транзакции передачи кадра управления в среде передачи данных  
 $T_{о.д.}$  – период ожидания поступления кадра данных или кадра управления  
 $T_{КД}$  – длительность передачи кадра данных  
 $T_{тр.ПД.}$  – длительность транзакции передачи кадра данных  
 $T_{ППД.ср}$  – среднее время выполнения подготовки передачи данных  
 $T_{о.п.}$  – период ожидания кадра квитанции  
 $T_{тр.ПД.ср}$  – времени транзакции передачи данных передачи данных  
 $T_{Hello}$  – период рассылки уведомлений  
 $T_{Пик}$  – период повторного измерения качества канала

- $T_{00c}$  – период обновления отношений соседства  
 $T_{КСК}$  – период квазистационарности физического канала  
 $T_{OK}$  – период оценки качества канала  
 $T_{ДОК}$  – период достоверности оценки качества физического канала  
 $T_l$  – время выполнения передачи данных соседнему узлу  
 $T_{ПД}$  – среднее время передачи блока данных  
 $T_{к.СУС}$  – время передачи кадра в среде установления соединения  
 $T_v$  – время восстановления системы  
 $T_{ТУС.в}$  – период восстановления трассы установления соединения  
 $T_{БД}$  – время выполнения процедуры передачи блока данных  
 $T_{ПД}$  – время передачи блока данных  
 $T_{т.ПД}$  – среднее время транзакции передачи данных  
 $T_{е.ПД.в}$  – время восстановления канала передачи данных  
 $T_{и.в}$  – время восстановления интерфейса узла  
 $T_{и}$  – времени наработки на отказ интерфейса узла  
 $T_{ТПД.в}$  – время восстановления трассы передачи данных  
 $T_{ЛПД}$  – время безотказной работы линии передачи данных  
 $T_{ЛПД.в}$  – время восстановления линии передачи данных  
 $T_{exp}$  – время проведения эксперимента  
 $T_{00c.д}$  – действующий период обновления отношений соседства  
 $w_{СУС}$  – интенсивность прохождения кадров через среду установления соединения  
 $w_{sk}$  – интенсивность потока данных на входе в линию передачи данных  $l_{sk}$   
 $w_{УСП}$  – интенсивность потока запросов готовности узла следующего перехода  
 $w_{ТПД}$  – интенсивность потока обращений к трассе передачи данных  
 $w_{sk}'$  – интенсивность потока данных на выходе из линии передачи данных  $l_{sk}$   
 $z$  – коэффициент превышения по напряжению (коэффициент защиты)

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Головин, О.В. Системы и устройства коротковолновой связи/ О.В. Головин, С.П. Простов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 598 с.
2. Хмельницкий, Е.А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в ДКМ диапазоне/ Е.А. Хмельницкий. – М.: Связь, 1975. – 232 с.
3. Головин, О.В. Декаметровая радиосвязь/ О.В. Головин. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
4. Долуханов, М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн/ М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1971. – 183с.
5. Долуханов, М.П. Распространение радиоволн/ М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1973. – 336 с.
6. Грудинская, Г.П. Распространение радиоволн/ Г.П. Грудинская. – М.: Высшая школа, 1967. – 244 с.
7. Девис, К. Радиоволны в ионосфере/ К. Днвис. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
8. Комарович, В.Ф. Случайные радиопомехи и надежность ДКМ связи/ В.Ф. Комарович, В.Н. Сосунов. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
9. Кловский, Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам/ Д.Д. Кловский. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
10. Черный, Ф.Б. Распространение радиоволн/ Ф.Б. Черный. – М.: Советское радио, 1972. – 464 с.
11. Финк, Л.М. Теория передачи дискретных сообщений/ Л.М. Финк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Советское радио, 1970. – 728 с.
12. Галлагер, Р. Теория информация и надёжная связь/ Р. Галлагер. – М.: Советское радио, 1974. – 720 с.
13. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ Б. Скляр. – 2-е изд. исправ. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
14. MIL-STD-188-141B Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems. Interface standard. – Department of Defense USA, 1999. – 584 с.
15. High frequency radio automatic link establishment (ALE): Application handbook/ National Telecommunications and Information Administration (NTIA): Institute for Telecommunication Sciences (ITS), Boulder Co., 1998. – 303 с.
16. Handbook. Frequency-adaptive communication systems and networks in the MF/HF bands/ International Telecommunication Union (ITU) Radio communication Bureau, 2002. – 65 с.
17. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2016. – 63 с.

18. Половко, А.М. Основы теории надежности/ А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
19. Вишневский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи данных/ В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 591 с.
20. Вишневский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей/ В.М. Вишневский. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
21. Простов, С. П. Исследование эффективности зонной системы декаметрового радиосвязи: дис.... канд. техн. наук: 05.12.13/ Простов Сергей Петрович. – М., 2000 – 183 с.
22. Бертсекас, Д. Сети передачи данных/ Д. Бертсекас, Р. Галлагаер. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
23. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями/ Л. Клейнрок. – 1979. – 600 с.
24. L. Kleinrock, L. Packet switching in radio channels: Part 1-Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics/ L. Kleinrock, F. A. Tobagi// IEEE Transactions on Communications. – 1975. – December. – vol. COM –23. – С. 1400.
25. Таненбаум, Э. Компьютерные сети/ Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 960 с.
26. Abramson, N. Development of the ALOHANET / N. Abramson// IEEE Trans, on Information Theory. – 1985. – March. – vol. IT-31. – С. 119.
27. Шахнович, И.В. Современные технологии беспроводной связи/ И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
28. Ilyas, M The handbook of ad hoc wireless networks/ edited by Mohammad Ilyas. – Boca Raton: CRC Press, 2003. – 599 с.
29. Wu, J Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks/ edited by Jie Wu. – Boca Raton: Auerbach Publications Taylor & Francis Group, 2006. – 852 с.
30. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы/ В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.
31. Педжман, Р. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Практическое руководство по изучению, разработке и использованию беспроводных ЛВС стандарта 802.11/ Р. Педжман, Л. Джонатан. – М.: Вильямс, 2004. – 304 с.
32. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. – IEEE Std 802.11-1997, 1997. – 445 с.
33. Столлингс, В. Беспроводные линии связи и сети/ В. Столлингс. – М.: Вильямс, 2003. – 640.

34. Fultz, G.L. Adaptive Routing Techniques for Store-and-Forward Computer-Communication Networks/ G.L. Fultz, L. Kleinrock// Proceedings of IEEE International Conference on Communications, 1971. – N 39. – С 1.
35. Столлингс, В. Компьютерные системы передачи данных/ В. Столлингс. – 6-е изд., – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 928 с.
36. RFC-4349 High-Level Data Link Control (HDLC) Frames over Layer 2 Tunneling Protocol, Version 3 (L2TPv3) [Электронный ресурс]. – IETF. – 2006. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc4349>
37. RFC-1226 Internet Protocol Encapsulation of AX.25 Frames [Электронный ресурс]. – IETF. – 2013. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc1226>
38. RFC-1661 The Point-to-Point Protocol (PPP) [Электронный ресурс]. – IETF. – 1994. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc1661>
39. Ретана, А. Принципы проектирования корпоративных IP-сетей/ А. Ретана, Д. Слайс, У. Расс. – М.: Вильямс, 2002. – 368 с.
40. Бунин, С.Г. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью/ С.Г. Бунин, А.П. Войтер. – К.: Техника, 1989. – 223 с.
41. Меркушев, О.В. Зондирование состояния декаметрового канала связи сигналами широкополосной несущей/ И.З. Климов, А.М. Чувашов// Труды VI международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – 2007. – С. 330.
42. 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». – 2007. – С. 332.
43. Белоусов, А.И. Дискретная математика/ А.И. Белоусов, С.Б. Ткачев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.
44. Свами, М. Графы, сети и алгоритмы/ М. Свами, К. Тхуласираман. – М.: Мир, 1984. – 455 с.
45. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ/ Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М.: МЦНМО, 2001. – 960 с.
46. Зыков, А.А. Основы теории графов/ А.А. Зыков. – М.: Вузовская книга, 2004. – 664 с.
47. Иванов, Б.Н. Дискретная математика. Алгоритмы и программы/ Б.Н. Иванов. – Учеб. Пособие. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 288 с.
48. Information technology -- Open Systems Interconnection -- Network service definition/ International Organization for Standardization [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/35872.html>

49. Меркушев, О.В. Процесс определения топологии радиосети передачи данных в декаметровом диапазоне частот/ О.В. Меркушев// Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. – 2008. – N 1. – С. 139.
50. Меркушев, О.В. Маршрутизация трафика в ненадежных каналах связи/ О.В. Меркушев, И.З. Климов// Межвузовский научный сборник «Вычислительная техника и новые информационные технологии», Уфа. – 2011. – N 7. – С. 149.
51. Вишневский, В.М. Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s/ В.М. Вишневский, Д. Лаконцев, А. Сафонов, С. Шпилев// Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2008. – N 6. – С. 64.
52. IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks--Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 10: Mesh Networking. – IEEE Std 802.11s-2011, 2011. – 372 с.
53. Royer, E.M. A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks/ E.M. Royer, C. Toh// IEEE Personal Communications. – 1999. – vol. 6. – no. 2. – С. 46.
54. Гоголева, М. А. Классификация и анализ методов маршрутизации в MESH-сетях/ М. А. Гоголева// Радиотехника. – 2008. – N 155. – С. 173.
55. Basagni, S. Mobile ad hoc networking/ S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, I. Stojmenovic. – John Wiley & Sons: 2004. – 416 с.
56. Zhao, H. A General Fault-Tolerant Minimal Routing for Mesh Architectures/ H. Zhao, N. Bagherzadeh, J. Wu// IEEE Transactions on Computers. – 2017. – Vol. 66. – С. 1240.
57. Perkins, C. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing/ C. Perkins, E. Belding-Royer// Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Syst. and Applications (WMCSA '99). – 1999. – С. 90.
58. RFC 3561 Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing [Электронный ресурс]. – IETF. – 2003. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>
59. Perkins, C. Ad Hoc On-demand Distance Vector Version 2 (AODVv2) Routing draft-perkins-manet-aodvv2-01 / C. Perkins, S. Ratliff, J. Dowdell, // IETF – 2017. – July.
60. Пакет, К. Создание масштабируемых сетей Cisco/ К. Пакет, Д. Тир. – М.: Вильямс, 2002. – 792 с.
61. Лемешко, А.В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной/ А.В. Лемешко// Праці УНДІРТ. – 2004. – N 4(40). – 12 с.

62. Albrightson, B. EIGRP-A fast protocol based on distance vector [Электронный ресурс]/ В. Albrightson, J.J. Garcia-Luna-Aceves, J. Boyle// UC Santa Cruz. – 1998. – Режим доступа: <https://escholarship.org/uc/item/9h48b8x2>
63. Меркушев, О.В. Метод определения маршрутов передачи пакетов в радиосети с ненадежными каналами связи/ О.В. Меркушев, И.З. Климов// Сборник докладов 2-й международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электроника и связь. РЭиС-2013», Омск. – 2013.
64. RFC 3626 Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2003. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc3626>.
65. RFC 7181 The Optimized Link State Routing Protocol Version 2/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2014. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181>.
66. Garcia-Lunes-Aceves, J.J. Loop-Free Routing Using Diffusing Computations/ J.J. Garcia-Lunes-Aceves// IEEE/ACM Transactions on networking. – 1993. – vol. 1. – N 1. – February.
67. Датьев И.О. Маршрутные метрики многошаговых беспроводных самоорганизующихся сетей/ И.О. Датьев// Кольский научный центр Российской академии наук. – 2015. – N 3(29). – С. 115.
68. RFC-7868 Cisco's Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP)/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2016. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc7868>.
69. RFC-6390 Guidelines for Considering New Performance Metric Development/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2011. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc6390>.
70. RFC-3611 RTP Control Protocol Extended Reports (RTCP XR)/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2003. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc3611>.
71. Albrightson, B. EIGRP -- a Fast Routing Protocol Based on Distance Vectors/ В. Albrightson, J. Garcia-Luna-Aceves, J. Boyle// Network/Interop 94. – 1994. – С.192.
72. Garcia-Luna-Aceves, J. J. Loop-free routing using diffusing computations/ J.J. Garcia-Luna-Aceves// IEEE/ACM Trans. Netw. – 1993. – N. 1(1). – С. 130.
73. RFC 3561 Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2003. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>.
74. Perkins, C. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers/ С. Perkins, P. Bhagwat, T.J. Watson// ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 1999. – vol. 24(4). – May.
75. RFC 6126 The Babel Routing Protocol/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2011. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc6126>.

76. Delay-based Metric Extension for the Babel Routing Protocol draft-jonglez-babel-rtt-extension-02/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2019. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/pdf/draft-jonglez-babel-rtt-extension-02>
77. Delay-based Metric Extension for the Babel Routing Protocol, draft-jonglez-babel-rtt-extension-01/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2019. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/id/draft-jonglez-babel-rtt-extension-02.html>.
78. RFC 6551 Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2012. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/pdf/rfc6551.pdf>
79. RFC 5548 Routing Requirements for Urban Low-Power and Lossy Networks/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2009. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc6551>
80. RFC 5673 Industrial Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2009. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc5673>
81. RFC 5827 Home Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2010. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc5826>
82. RFC 5867 Building Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks/ [Электронный ресурс]. – IETF. – 2010. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc5867>.
83. Owczarek, P. Metrics in routing protocol for wireless mesh networks/ P. Owczarek, P. Zwierzykowski// Image Processing & Communication. – 2014. – vol. 18, N. 4, C. 7.
84. Hu, P. Context-Aware Routing in Wireless Mesh Networks/ P. Hu, M. Portmann, R. Robinson, J. Indulshka// Processing of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Context-Awareness for Self-Managing Systems (CASEMANS). – 2008. – vol. 281. C. 16.
85. A Alabady, S. Overview of Wireless Mesh Networks/ S. A Alabady, M. Salleh// Journal of Communications. – 2013. – vol. 8. – N. 9. – C. 134.
86. VenkatMohan, S. ETX Based Routing Metrics/ S. VenkatMohan, N. Kasivis-wanath// (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies. – 2011. – vol. 2(4). – C. 1537.
87. Draves, R. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks/ R. Draves, J. Padhye, B. Zill// MobiCom'04: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. – 2004. – C. 114.
88. Subramanian, P. Interference Aware Routing in Multi-Radio Wireless Mesh Networks/ P. Subramanian, M. Buddhikot, S. Miller// 2<sup>nd</sup> IEEE Workshop Wireless Mesh Networks (WiMesh 2006). – 2006. – C. 55.

89. Franceschetti M. Random Networks for Communication: From Statistical Physics to Information Systems/ M. Franceschetti, R. Meester. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 196 с.
90. Liang, M. A routing metric for load-balancing in wireless mesh networks/ M. Liang, M. Denko// Journal of interconnection Networks. – 2007. – N 2. – С. 409.
91. Антонов, А.В. Системный анализ/ А.В. Антонов. – 2-е изд., стер. – М.: ВШ, 2006. – 454 с.
92. Харисов, В.Н. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ под. ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
93. Перов, А.И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ под. ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
94. Слепов, Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных систем связи/ Н.Н. Слепов. – М.: Радио и связь, 2003. – 468 с.
95. Меркушев, О.В. Определение правил доступа к среде радиосети КВ – диапазона на этапе установления соединения/ О.В. Меркушев, И.З. Климов// Вестник ИжГТУ, Ижевск – 2009. – N 2. – С. 107.
96. Меркушев, О.В. Моделирование процесса установления соединения узлами радиосети передачи данных в ненадежных каналах связи/ О.В. Меркушев, 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.
97. Меркушев, О.В. Проектирование радиосети передачи данных в ненадежных каналах связи/ О.В. Меркушев, И.З. Климов// Сборник материалов международной научно-практической конференции «Результативная инновационная деятельность как фактор обеспечения национальной безопасности», Ижевск – 2010. – С.107.
98. Крылов, В.В. Теория телетрафика и её приложения/ В.В. Крылов, С.С. Самохвалов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 288 с.
99. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания/ Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
100. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей/ Е.С. Вентцель. – 4-е изд. стереот. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
101. Гихман, И.И. Теория случайных процессов/ И.И. Гихман, А.В. Скороход – М.: Наука, 1971. – 661 с.

102. Меркушев, О.В. Определение времени передачи сообщений контроля топологии между соседними узлами зонной ДКМ-радиосети/ О.В. Меркушев, И.З. Климов// Вестник ИжГТУ, Ижевск – 2011. – N 3. – С. 119.
103. Меркушев, О.В. Метод маршрутизации пакетов в радиосети передачи данных с ненадежными каналами связи/ О.В. Меркушев, И.З. Климов// Сборник докладов научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2013) и НПФ «Саквее» – 2013.
104. 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. РЭС-2015», Омск – 2015.
105. Меркушев, О.В. Модель надежности маршрутизации данных в распределенной системе с ненадежными физическими каналами/ О.В. Меркушев// «Вестник ИжГТУ», Ижевск – 2019. – том 22, N 2.
106. Государственный стандарт СССР ГОСТ 17657-79 Передача данных. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2005. – 171 с.
107. Иьуду, К.А. Надежность контроль и диагностика вычислительных машин и систем/ К.А. Иьуду – М.: ВШ, 1989. – 216 с.
108. 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, N 2.
109. Рао, С.Р. Линейные статистические методы и их применение/ С.Р. Рао. – М.: Наука, 1968. – 547с.
110. Мищенко, З.В. Функции Statistics Toolbox [Электронный ресурс]/ З.В. Мищенко// Экспонента. – 2016. – Режим доступа: <https://hub.exponenta.ru/post/funktsii-statistics-toolbox392>
111. Вентцель, Е.С. Исследование операций/ Е.С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
112. 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. N 1. – С. 106.
113. Комашинский, В.И. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации / В.И. Комашинский, А.В. Максимов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 173 с.

114. 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. N 6. – С. 162.

## СПИСОК ИЛЛЮСТРИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

1. Рисунок 1.4.1 Топология исследуемой коммуникационной системы.	27
2. Рисунок 2.2.1 Структурная схема узла исследуемой коммуникационной системы.	43
3. Рисунок 2.2.2 Схема взаимодействия узлов исследуемой коммуникационной системы.	43
4. Рисунок 2.3.1 Схема базового доступа к среде установления соединения в режиме одноадресного вызова.	47
5. Рисунок 2.3.2 Граф состояний группы узлов с конкурентным доступом к среде установления соединения.	49
6. Рисунок 2.3.3 Среднее время задержки обслуживания в среде установления соединения.	51
7. Рисунок 2.3.4 Среднее время задержки установления соединения.	53,54
8. Рисунок 2.4.1.1 Схема выполнения процедуры подготовки передачи данных.	57
9. Рисунок 2.4.1.2 Среднее время выполнения процесса подготовки передачи данных.	59
10. Рисунок 2.4.2.1 Схема базового доступа к среде передачи данных.	60
11. Рисунок 2.4.2.2 Среднее время транзакции передачи данных при различных значениях вероятности потери кадра $Q_{ПК}$ и допустимого количества повторных попыток передачи $r$ .	63
12. Рисунок 3.1.1 Граф топологии исследуемой коммуникационной системы.	70
13. Рисунок 3.1.2 Конечная последовательность ребер $(l_{s,k}, l_{k,\dots}, \dots, l_{\dots,d})$ , составляющих маршрут доставки сообщений от узла $s$ до узла $d$ .	70
14. Рисунок 3.1.3 Маршрут от узла источника $s$ до узла назначения $d$ при диффузном распространении маршрутной информации.	71
15. Рисунок 3.1.4 Схема модели маршрута доставки сообщений от узла источника $s$ до узла назначения $d$ .	71
16. Рисунок 3.1.5 Граф состояний маршрута доставки сообщений.	72
17. Рисунок 3.1.6 Граф вероятных маршрутов доставки сообщений от текущего узла $s$ до удаленного узла назначения $d$ .	74
18. Рисунок 3.2.1 Базовая структура линии передачи данных.	77
19. Рисунок 3.3.1 Изменения состояния канала.	83
20. Рисунок 3.3.2 Изменения надежности канала.	84
21. Рисунок 3.4.1.1 Структурная схема среды установления соединения.	86
22. Рисунок 3.4.1.2 Граф среды установления соединения.	87
23. Рисунок 3.4.1.3 Зависимость коэффициента готовности среды установления соединения от интенсивности отказов физического канала.	88
24. Рисунок 3.4.1.4 Надежность среды установления соединения.	89
25. Рисунок 3.4.2.1 Структурная схема трассы установления соединения.	93

26. Рисунок 3.4.2.2 Граф состояний трассы установления соединения.	93
27. Рисунок 3.4.2.3 Зависимость коэффициента готовности трассы установления соединения от интенсивности отказов среды установления соединения.	95
28. Рисунок 3.4.2.4 Изменения коэффициента готовности трассы установления соединения.	96
29. Рисунок 3.5.1 Коэффициент готовности узла следующего перехода.	101
30. Рисунок 3.6.1.1 Структурная схема канала передачи данных.	104
31. Рисунок 3.6.1.2 Граф состояний канала передачи данных $e_{пд,i} \in E_{пд}$ .	104
32. Рисунок 3.6.1.3 Коэффициент готовности канала передачи данных при допустимом количестве попыток передачи кадра данных.	106
33. Рисунок 3.6.1.4 Структурная схема интерфейса узла.	108
34. Рисунок 3.6.1.5 Граф состояний интерфейса узла.	109
35. Рисунок 3.6.1.6 Зависимость коэффициента готовности интерфейса, состоящего из $g$ каналов передачи данных.	111
36. Рисунок 3.6.1.7 Коэффициент готовности интерфейса узла $F_{и}$ .	112
37. Рисунок 3.6.2.1 Схема трассы передачи данных.	114
38. Рисунок 3.6.2.2 Граф состояний трассы передачи данных.	114
39. Рисунок 3.6.2.3 Коэффициент готовности трассы передачи данных, состоящей из $n$ каналов передачи данных.	116
40. Рисунок 3.6.2.4 Изменения коэффициента готовности трассы передачи данных.	117
41. Рисунок 3.7.1 Структурная схема линии передачи данных соседних узлов $\{s, k\}$ .	119
42. Рисунок 3.7.2 Граф состояний системы – линия передачи данных.	120
43. Рисунок 3.7.3 Коэффициент готовности линии передачи данных при различных значениях каналов установления соединения передачи данных.	123
44. Рисунок 3.7.4 Коэффициент готовности линии передачи данных при различных значениях интенсивности обращений к узлу следующего перехода.	125
45. Рисунок 4.1.1 Структурная схема имитационной модели исследуемой коммуникационной системы.	134
46. Рисунок 4.2.1 Вероятность ошибки элемента сигнала $\{p_{ош,i}\}$ .	140
47. Рисунок 4.2.2 Вероятности надежного приема дискретного сообщения (1) и исправного состояния (2) физического канала $e_{ус,1} \in E_{ус}$ , определенные узлом $n1$ при получении кадров от узла $n0$ .	141
48. Рисунок 4.3.1.1 Коэффициент готовности среды установления соединения (1) физического канала $e_{ус,2} \in E_{ус}$ .	145
49. Рисунок 4.3.2.1 Коэффициент готовности трассы установления соединения узлов $\{n0, n1\}$ .	147

50. Рисунок 4.4.1 Коэффициенты готовности узлов следующего перехода. 151
51. Рисунок 4.5.1.1 Коэффициент готовности  $I_{01}$  узла  $n0$  с узлом  $n1$ . 154
52. Рисунок 4.5.2.1 Коэффициент готовности трассы передачи данных  $F_{ТПД,01}$ . 156
53. Рисунок 4.6.1 Коэффициент готовности линии передачи данных узлов  $\{n0, n1\}$ . 159
54. Рисунок 4.7.1 Схема линий передач данных, сформированных узлом  $n0$  с соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$ . 162
55. Рисунок 4.7.2 Топология коммуникационной системы, определенная узлом  $n0$  по средствам обмена информацией с соседними узлами  $\{n1, n2, n3\}$ . 163

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Исследование процесса обмена данными в условиях нестационарности среды распространения сигналов

#### А.1 Формат кадра протокола установления соединения

Кадр среды установления соединения (рисунок А.1.) включает в себя настроечную последовательность, преамбулу и блок полезных данных, размером 26 бит. Время передачи данного кадра на скорости 2400PSK/с составляет  $T_{\text{кадр.СУС}} = 613.333\text{мс}$ . Для адресации станций используются адреса длиной 6 бит, что обеспечивает выполнение условий, определяющих ограниченное количество узлов ( $m \leq 32(64)$ ). Поля кода команды и аргументов используются для передачи команд модуля установления соединения.



Рисунок А.1 Формат кадра среды установления соединения; DA – адрес назначения; SA – адрес источника; CMD – код команды; ARG – аргументы команды; FCS – контрольная последовательность кадра

Кадр имеет фиксированный формат и состоит из следующих полей:

- DA (Destination Address) – адрес назначения (6 бит);
- SA (Source Address) – адрес источника (6 бит);
- Cmd (Command) – поле кода команды модуля установления соединения (4 бита);
- Arg (Arguments) – поле аргументов команды (6 битов);
- FCS (Frame Check Sequence) – контрольная последовательность кадра (4 бита).

#### А.2 Результаты математического моделирования процесса установления соединения

Доступ к среде установления соединения выполняется в синхронном режиме. Для канала установления соединения  $e_{\text{УС.}i} \in E_{\text{УС}}$  длительность слота выбрана равной  $T_{\text{сл.СУС}} = 800\text{мс}$ . Этого достаточно для подготовки и передачи кадра модуля установления соединения, имеющего длительность  $T_{\text{кадр.СУС}} = 613.333\text{мс}$  (приложение А.1).

Время активного канала состоит из  $s$  слотов. Слот с номером 0 используется при переключении с канала на канал узлами для настройки. В течение этого слота узлы не выполняют попыток передачи и приема кадров. Следующие слоты времени канала используются для передачи команд и данных модуля установления соединения. Количество слотов обеспечивает возможность использования канала более чем одной парой узлов в режимах индивидуальной и групповой адресации. Количество используемых слотов канала

принято равным 4 (общее число слотов  $s = 5$ ), следовательно, время активности канала установления соединения, в соответствии с (2.3.1), составляет:

$$T_K = 4с. \quad (A.2.1)$$

В результате математического моделирования процессов установления соединения между соседними узлами получены численные значения задержки установления соединения, показанные в таблице А.2.1.

Таблица А.2.1 – Средняя задержка установления соединения

Задержка установления соединения					
Интенсивность поступления кадров в среду УС	Вероятность попытки передачи задолженным узлом в текущем слоте				
	1/3	1/6	1/9	1/12	1/15
0,050	0,149	0,258	0,371	0,485	0,599
0,108	0,339	0,572	0,813	1,050	1,283
0,165	0,547	0,891	1,241	1,575	1,893
0,223	0,767	1,199	1,626	2,020	2,380
0,280	0,990	1,479	1,949	2,364	2,730
0,338	1,208	1,721	2,200	2,606	2,954
0,395	1,412	1,918	2,381	2,760	3,076
0,453	1,595	2,070	2,500	2,843	3,123
0,510	1,752	2,179	2,569	2,874	3,119
0,568	1,880	2,252	2,598	2,866	3,080
0,625	1,980	2,294	2,598	2,833	3,019
0,683	2,054	2,311	2,577	2,782	2,945
0,740	2,103	2,309	2,541	2,721	2,863
0,798	2,132	2,293	2,496	2,653	2,779
0,855	2,145	2,267	2,443	2,582	2,693
0,913	2,143	2,232	2,387	2,510	2,609
0,970	2,131	2,193	2,329	2,439	2,527
1,028	2,110	2,150	2,270	2,368	2,447
1,085	2,083	2,105	2,211	2,299	2,370
1,143	2,052	2,059	2,153	2,232	2,297

### А.3 Формат управляющего кадра протокола передачи данных

Модуль доступа к среде передачи данных использует управляющий кадр фиксированного формата длиной 48 битов (рисунок А.3.1). Время передачи кадра составляет:

$$T_{TM\_Fr} = 1306.67\text{мс.}$$



Рисунок А.3.1 Формат управляющего кадра модуля доступа к среде передачи данных; Pr – идентификатор протокола; DA – адрес назначения; SA – адрес источника; FT – тип кадра; ARG – аргументы соответствующего типа кадра; FCS – контрольная последовательность кадра

Кадр управления имеет фиксированный формат и состоит из следующих полей:

- Pr (идентификатор протокола (2 бита)) – поле содержит значение, идентифицирующее протокол, которому принадлежит текущий кадр;
- DA (адреса назначения (6 бит)) – битное поле содержит адрес узла назначения;
- SA (адрес источника (6 бит)) – поле содержит адрес узла источника;
- FT (типа кадра (4 бита)) – поле определяет тип кадра (Request, Confirm, Fin и т.п.);

- Arg (аргументы (18 бит)) – поле используется для указания аргументов соответствующего типа кадра;
- FCS (контрольной суммы (12 бит)) – поле содержит контрольную сумму кадра.

#### **А.4 Базовые характеристики среды передачи данных**

Для выполнения моделирования процесса подготовки передачи данных были использованы характеристики физического и канального уровней пакетной системы обмена данными стандарта ALE 3G [14]. Время настройки приемопередающих модулей узлов на заданный канал передачи данных равным:

$$T_{н.к.ПД} = 666.67\text{мс.} \quad (\text{А.4.1})$$

Формат управляющего кадра среды передачи данных приведен в приложении А.3. Длительность передачи управляющего кадра  $T_{к.у.СПД}$  системы ALE 3G [14]:

$$T_{к.у.СПД} = 1306.67\text{мс.} \quad (\text{А.4.2})$$

Величина минимального межкадрового интервала  $T_{ММИ}$  системы ALE 3G [14]:

$$T_{ММИ} = 201\text{мс,} \quad (\text{А.4.3})$$

Длительность транзакции управления в этом случае равна:

$$T_{тр.у.СПД} = 1507.67\text{мс.} \quad (\text{А.4.4})$$

Длительность периода ожидания подтверждения соединения:

$$T_{о.пс} = 2 * T_{тр.у.СПД} = 3015.34\text{мс.} \quad (\text{А.4.5})$$

Для надежного обнаружения несущей требуется принять  $10 \div 15$  символов передаваемого кадра (преамбула) [14]. В системе ALE 3G при частоте несущей 1800Гц [14] время обнаружения несущей равно:

$$T_{ОН} = 15 * \frac{1}{1800} \approx 8\text{мс.} \quad (\text{А.4.6})$$

Время переключения физического уровня с приема на передачу равно [14]:

$$T_{ППП} < 1\text{мс.} \quad (\text{А.4.7})$$

Время распространения сигнала для исследуемой зонной коммуникационной системы прием равным:

$$T_{РС} \approx 1\text{мс.} \quad (\text{А.4.8})$$

$T_{ФК} \approx 200\text{мс}$  – задержка при формировании кадра формата BW1 [14].

#### **А.5 Результаты математического моделирования процесса подготовки передачи данных**

В результате математического моделирования получены зависимости задержки выполнения процедуры подготовки передачи данных  $T_{ПД,ср}$  от вероятности потери кадров  $Q_{ПК}$

и допустимого количества повторных попыток выполнения процедуры  $r$ . В таблице А.5.1 приведены численные результаты математического моделирования процесса подготовки передачи данных при различных значениях вероятности потери кадров  $Q_{ПК}$  и величины  $r$ .

Таблица А.5.1 – Среднее время подготовки передачи данных  $T_{ПД,ср}$ 

Время в секундах

r	Вероятность потери кадров $Q_{ПК}$											
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
1	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820	3,6820
2	3,6820	4,2549	4,7675	5,2198	5,6118	5,9435	6,2149	6,4260	6,5767	6,6672	6,6974	6,6974
3	3,6820	4,3638	5,1583	6,0041	6,8469	7,6396	8,3425	8,9230	9,3557	9,6225	9,7127	9,7127
4	3,6820	4,3845	5,2990	6,4041	7,6374	8,9117	10,1297	11,1953	12,0235	12,5483	12,7280	12,7280
5	3,6820	4,3884	5,3497	6,6081	8,1433	9,8658	11,6310	13,2630	14,5845	15,4448	15,7434	15,7434
6	3,6820	4,3891	5,3679	6,7121	8,4670	10,5814	12,8920	15,1447	17,0432	18,3124	18,7587	18,7587
7	3,6820	4,3893	5,3745	6,7652	8,6742	11,1180	13,9513	16,8570	19,4034	21,1513	21,7741	21,7741
8	3,6820	4,3893	5,3768	6,7923	8,8069	11,5205	14,8411	18,4152	21,6693	23,9618	24,7894	24,7894

### А.6 Длительность кадра данных

Для обмена данными в среде передачи данных использован кадр формата BW2 стандарта ALE 3G [14]. Длительность передачи кадра формата BW2 определяется выражением [14]:

$$T_{Tx.BW2} = 126.67 + (NumPKTs * 400)мс., \quad (A.6.1)$$

где  $NumPKTs = 3, 6, 12, 24$  – количество инкапсулированных в кадр блоков полезных данных. Положим, что все узлы сети являются статистически однородными. Статистическая однородность узлов заключается в одинаково вероятностном распределении длин пакетов, выбираемых каждым узлом для передачи данных. Примем, что средняя длина полезной нагрузки кадра данных составляет:

$$L_{КД} = 21161\text{бит}. \quad (A.6.2)$$

Время передачи кадра средней длины составит:

$$T_{КД} = 4626.67\text{мс}. \quad (A.6.3)$$

Тогда, блок данных объемом  $D$  передается кадрами размера  $L_{КД}$ , в течение цикла передачи данных, состоящего из  $N$  итераций передачи кадров данных. Каждая итерация представляет собой транзакцию передачи данных и равна:

$$T_{т.пд} = T_{КД} + T_{ММИ} + T_{КУ.СПД} + T_{ММИ} = T_{КД} + T_{КУ.СПД} + 2 * T_{ММИ} = 6335.34\text{мс}. \quad (A.6.4)$$

### А.7 Результаты математического моделирования процесса передачи данных

В результате моделирования получены зависимости времени транзакции передачи данных передачи данных  $T_{тр.пд.ср}$  от вероятности потери кадров  $Q_{ПК}$  и допустимого количества повторных попыток выполнения процедуры  $r$ . Численные результаты математического моделирования времени транзакции передачи данных при различных значениях вероятности потери кадров  $Q_{ПК}$  и допустимого количества повторных попыток передачи данных  $r$  приведены в таблице А.7.1

Таблица А.7.1 – Среднее время транзакции передачи данных  $T_{тр.пд.ср}$

Время в секундах

r	Вероятность потери кадров $Q_{ПК}$										
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353	6,3353
2	6,3353	13,8744	14,9514	15,9017	16,7253	17,4222	17,9924	18,4358	18,7526	18,9427	19,0060
3	6,3353	14,1031	15,7725	17,5495	19,3203	20,9858	22,4626	23,6821	24,5913	25,1519	25,3414
4	6,3353	14,1466	16,0680	18,3899	20,9810	23,6585	26,2176	28,4563	30,1964	31,2991	31,6767
5	6,3353	14,1548	16,1745	18,8185	22,0439	25,6631	29,3717	32,8007	35,5773	37,3848	38,0120
6	6,3353	14,1564	16,2128	19,0371	22,7242	27,1665	32,0213	36,7542	40,7429	43,4097	44,3474
7	6,3353	14,1567	16,2266	19,1486	23,1595	28,2940	34,2469	40,3518	45,7020	49,3743	50,6827
8	6,3353	14,1567	16,2315	19,2054	23,4382	29,1397	36,1164	43,6257	50,4626	55,2792	57,0181

### А.8 Параметры обновления отношений соседства

Для того, чтобы выполнять периодическую проверку всех имеющихся каналов среды установления соединения кадр Hello передается с чередованием каналов, при этом коэффициент чередования  $K_{ч.к.}$  является простым числом для исключения кратности, приводящей к пропуску некратных каналов. Для выполнения моделирования примем, что:

$$K_{ч.к.} = 7. \quad (A.8.1)$$

Тогда, величина периода передачи Hello составит:

$$T_{hello} = T_k * K_{ч.к.} = 28с. \quad (A.8.2)$$

Период повторного измерения качества канала среды установления соединения равен:

$$T_{п.и.к.} = T_{hello} * N_{к.УС} = 224с., \quad (A.8.3)$$

где  $N_{к.УС} = 8$  – количество каналов среды установления соединения.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Разработка методов оценки надежности маршрутов передачи данных в коммуникационной системе с нестационарной топологией

#### Б.1 Численные результаты моделирования надежности физического канала

На рисунке Б.1.1 показаны результаты математического моделирования  $P_{\text{нпдс}}$  физического канала при снижении  $p_{\text{ош}}$ .

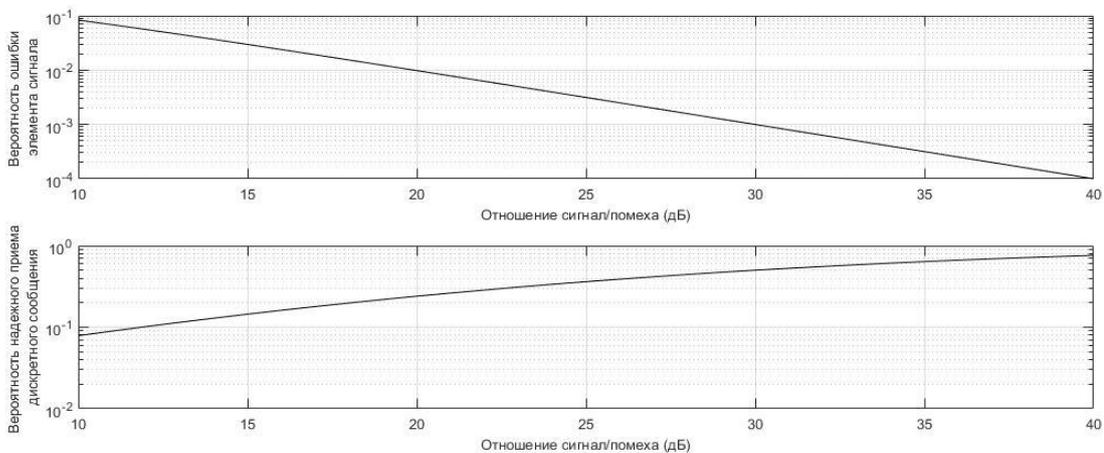


Рисунок Б.1.1 Зависимость вероятности надежного приема дискретного сообщения при снижении вероятности ошибки элемента сигнала

Численные результаты математического моделирования  $P_{\text{нпдс}}$  физического канала приведены в таблице Б.1.1 (приложение Б.1). При увеличении отношения сигнал/помеха в диапазоне  $10\text{дБ} \leq z \leq 40\text{дБ}$  происходит снижение вероятности ошибки элемента сигнала  $0.083 \geq p_{\text{ош}} \geq 10^{-4}$ . При этом вероятность надежного приема дискретного сообщения изменяется в пределах  $0.079 \leq P_{\text{нпдс}} \leq 0.76$ .

Таблица Б.1.1 Диапазон изменений вероятностей ошибки элемента сигнала и надежного приема дискретного сообщения

Отношение сигнала/помеха (Z)	Вероятность ошибки элемента сигнала ( $p_{\text{ош}}$ )	Вероятность надежного приема дискретного сообщения ( $P_{\text{нпдс}}$ )	Интенсивность возникновения отказов	Интенсивность восстановления
40	1,00E-04	0,760441	0,005871	0,018635
39	0,000126	0,737941	0,00605	0,017035
38	0,000158	0,714405	0,006249	0,015632
37	0,000199	0,689908	0,006471	0,014397
36	0,000251	0,664538	0,006718	0,013308
35	0,000316	0,638394	0,006993	0,012346
34	0,000398	0,611587	0,0073	0,011494
33	0,000501	0,584238	0,007641	0,010738
32	0,00063	0,556474	0,008022	0,010065
31	0,000793	0,528431	0,008448	0,009467
30	0,000998	0,500245	0,008924	0,008933

29	0,001256	0,472059	0,009457	0,008456
28	0,00158	0,444011	0,010054	0,008029
27	0,001987	0,416242	0,010725	0,007647
26	0,002499	0,388884	0,01148	0,007305
25	0,003142	0,362067	0,01233	0,006998
24	0,00395	0,335911	0,01329	0,006722
23	0,004962	0,310526	0,014377	0,006475
22	0,006231	0,286013	0,015609	0,006253
21	0,007819	0,262459	0,017009	0,006053
20	0,009804	0,239941	0,018606	0,005874
19	0,01228	0,21852	0,02043	0,005713
18	0,015362	0,198243	0,022519	0,005568
17	0,019187	0,179146	0,02492	0,005439
16	0,023917	0,16125	0,027686	0,005323
15	0,029742	0,144562	0,030881	0,005219
14	0,036875	0,129079	0,034586	0,005126
13	0,045553	0,114785	0,038893	0,005043
12	0,056026	0,101655	0,043916	0,004969
11	0,068544	0,089654	0,049795	0,004904
10	0,083333	0,07874	0,056697	0,004846

Выполнено математическое моделирование процесса приема кадров управления от соседнего узла при изменениях интенсивности помех. Численные результаты исходной последовательности  $\{p_{\text{ош.}i}\}$  приведены в таблице Б.1.2. Для каждого значения  $p_{\text{ош.}i}$ , получены значения вероятности надежного приема дискретных сообщений  $P_{\text{нпдс.}i}$ . В результате экстраполяции  $\{P_{\text{нпдс.}i}\}$  получены значения вероятности исправного состояния канала  $\{P_{\text{иск.}i}\}$ . Численные результаты математического моделирования вероятности надежного приема дискретного сообщения и исправного состояния физического канала приведены в таблице Б.2.1. Таблица Б.1.2 Прогнозируемая вероятность исправного состояния физического канала, интенсивности отказов и восстановлений

Номер отсчета	Отношение сигнал/помеха (Z)	Вероятность ошибки элемента сигнала ( $p_{\text{ош}}$ )	Вероятность надежного приема дискретного сообщения ( $P_{\text{нпдс}}$ )
1	37,1844	0,000191	1
2	37,3908	0,000182	1
3	16,4474	0,021678	2,13E-01
4	42,9052	5,12E-05	0,783203
5	35,7342	0,000267	0,637659
6	20,5045	0,008748	0,295685
7	20,1031	0,009578	0,269179
8	25,9051	0,002554	0,345711
9	24,6416	0,003411	0,097559
10	39,655	0,000108	7,91E-01
11	40,1864	9,58E-05	0,802506
12	32,113	0,000614	5,81E-01
13	40,2636	9,41E-05	0,966339
14	31,0982	0,000775	5,62E-01
15	43,2661	4,71E-05	9,41E-01
16	42,1862	6,04E-05	0,94006
17	17,3125	0,017903	0,229213
18	38,3629	0,000146	0,686762
19	33,6797	0,000428	0,594137
20	27,8024	0,001653	0,432313
21	38,4089	0,000144	0,881949

22	25,4991	0,002803	0,293027
23	24,3415	0,003653	0,267103
24	35,6647	0,000271	0,713963
25	28,9406	0,001273	0,441994
26	30,9559	0,000801	5,58E-01
27	41,4727	7,12E-05	0,927373
28	25,0445	0,003111	0,309198
29	32,4171	0,000573	0,59966
30	37,6768	0,000171	0,77743
31	18,3473	0,014215	0,165103
32	31,0289	0,000788	0,535663
33	28,3037	0,001473	0,440905
34	34,5727	0,000349	0,679023
35	32,6206	0,000546	0,758536
36	30,2913	0,000933	0,530965
37	21,7861	0,006541	0,151513
38	39,2337	0,000119	8,18E-01
39	44,9288	3,21E-05	0,85071
40	34,9234	0,000322	0,638386
41	38,4527	0,000143	0,925576
42	30,4824	0,000893	0,5227
43	26,0557	0,002468	0,30256
44	31,8061	0,000659	0,598763
45	14,4729	0,033324	8,19E-02
46	46,5926	2,19E-05	0,810325
47	39,3052	0,000117	0,683723
48	11,6722	0,059892	0,230115
49	16,872	0,019738	0,292143
50	35,7538	0,000266	0,617165
51	28,3901	0,001445	0,458695
52	29,6956	0,00107	0,489423
53	13,9786	0,037043	0,109871
54	31,255	0,000748	0,544539
55	31,8054	0,000659	0,559859
56	36,3511	0,000232	0,676042
57	15,273	0,028031	1,29E-01
58	40,2028	9,54E-05	0,744725
59	19,3839	0,011265	0,271182
60	30,6054	0,000868	5,15E-01
61	45,1332	3,07E-05	8,27E-01
62	43,2951	4,68E-05	0,782919
63	33,8821	0,000409	6,51E-01
64	40,6192	8,67E-05	0,936343

Продолжение таблицы Б.1.2 Прогнозируемые вероятность исправного состояния физического канала, интенсивности отказов и восстановлений

Номер отсчета при интерполяции	Вероятность исправного состояния канала (Риск)	Время до возникновения отказа (Тиск)	Время до восстановления (Твк)	Интенсивность возникновения отказов канала	Интенсивность восстановления канала
1,00	1	224	0	4,46E-03	-
1,50	1	224	0	4,46E-03	-
2,00	9,25E-01	207,2381	16,76188	4,83E-03	0,059659
2,50	0,551383	123,5097	100,4903	8,10E-03	0,009951
3,00	0,415153	92,99428	131,0057	1,08E-02	0,007633
3,50	0,455782	102,0951	121,9049	9,79E-03	0,008203
4,00	0,557804	124,9482	99,0518	8,00E-03	0,010096
4,50	0,632038	141,5764	82,42356	7,06E-03	0,012132
5,00	0,63709	142,7081	81,29186	7,01E-03	0,012301
5,50	5,73E-01	128,3349	95,66507	7,79E-03	0,010453

6,00	0,464737	104,1011	119,8989	9,61E-03	0,00834
6,50	3,47E-01	77,67407	146,3259	1,29E-02	0,006834
7,00	0,250165	56,03704	167,963	1,78E-02	0,005954
7,50	1,96E-01	43,94133	180,0587	2,28E-02	0,005554
8,00	1,94E-01	43,38832	180,6117	2,30E-02	0,005537
8,50	0,240432	53,8567	170,1433	1,86E-02	0,005877
9,00	0,325733	72,96425	151,0357	1,37E-02	0,006621
9,50	0,434348	97,29385	126,7062	1,03E-02	0,007892
10,00	0,549931	123,1844	100,8156	8,12E-03	0,009919
10,50	0,657868	147,3625	76,63747	6,79E-03	0,013048
11,00	0,747129	167,3569	56,64311	5,98E-03	0,017654
11,50	0,81112	181,6909	42,30914	5,50E-03	0,023636
12,00	0,847687	189,8819	34,1181	5,27E-03	0,02931
12,50	0,858472	192,2978	31,70223	5,20E-03	0,031544
13,00	0,847881	189,9253	34,07474	5,27E-03	0,029347
13,50	8,22E-01	184,1049	39,89506	5,43E-03	0,025066
14,00	0,786947	176,2762	47,7238	5,67E-03	0,020954
14,50	0,748949	167,7646	56,23541	5,96E-03	0,017782
15,00	0,712637	159,6306	64,36941	6,26E-03	0,015535
15,50	0,681189	152,5864	71,41365	6,55E-03	0,014003
16,00	0,656148	146,9773	77,02275	6,80E-03	0,012983
16,50	0,637577	142,8173	81,1827	7,00E-03	0,012318
17,00	0,62439	139,8634	84,13657	7,15E-03	0,011885
17,50	0,614783	137,7114	86,28857	7,26E-03	0,011589
18,00	0,606684	135,8973	88,10273	7,36E-03	0,01135
18,50	0,598168	133,9896	90,01037	7,46E-03	0,01111
19,00	0,587781	131,6629	92,33711	7,60E-03	0,01083
19,50	5,75E-01	128,7443	95,25572	7,77E-03	0,010498
20,00	0,559073	125,2323	98,76766	7,99E-03	0,010125
20,50	0,541466	121,2884	102,7116	8,24E-03	0,009736
21,00	0,523235	117,2047	106,7953	8,53E-03	0,009364
21,50	0,506056	113,3565	110,6435	8,82E-03	0,009038
22,00	0,491719	110,145	113,855	9,08E-03	0,008783
22,50	0,481868	107,9385	116,0615	9,26E-03	0,008616
23,00	4,78E-01	107,0209	116,9791	9,34E-03	0,008549
23,50	0,480136	107,5505	116,4495	9,30E-03	0,008587
24,00	0,489001	109,5363	114,4637	9,13E-03	0,008736
24,50	0,50371	112,8311	111,1689	8,86E-03	0,008995
25,00	0,522962	117,1436	106,8564	8,54E-03	0,009358
25,50	0,544938	122,0662	101,9338	8,19E-03	0,00981
26,00	0,567482	127,1159	96,88406	7,87E-03	0,010322
26,50	0,588319	131,7834	92,2166	7,59E-03	0,010844
27,00	0,605289	135,5848	88,41525	7,38E-03	0,01131
27,50	0,616569	138,1115	85,8885	7,24E-03	0,011643
28,00	0,620861	139,0728	84,92719	7,19E-03	0,011775
28,50	0,61753	138,3267	85,67332	7,23E-03	0,011672
29,00	6,07E-01	135,8967	88,10328	7,36E-03	0,01135
29,50	0,589166	131,9731	92,02691	7,58E-03	0,010866
30,00	0,566508	126,8977	97,10228	7,88E-03	0,010298
30,50	5,41E-01	121,1351	102,8649	8,26E-03	0,009721
31,00	5,14E-01	115,2312	108,7688	8,68E-03	0,009194
31,50	0,490019	109,7643	114,2357	9,11E-03	0,008754
32,00	4,70E-01	105,2929	118,7071	9,50E-03	0,008424
32,50	0,456715	102,3041	121,6959	9,77E-03	0,008217
33,00	0,45164	101,1675	122,8325	9,88E-03	0,008141
33,50	0,455806	102,1006	121,8994	9,79E-03	0,008203
34,00	0,469396	105,1447	118,8553	9,51E-03	0,008414
34,50	0,491783	110,1595	113,8405	9,08E-03	0,008784
35,00	0,521555	116,8284	107,1716	8,56E-03	0,009331
35,50	0,556637	124,6866	99,3134	8,02E-03	0,010069

36,00	0,59445	133,1568	90,84322	7,51E-03	0,011008
36,50	0,63212	141,5948	82,40521	7,06E-03	0,012135
37,00	0,666741	149,3499	74,65007	6,70E-03	0,013396
37,50	0,695592	155,8126	68,18736	6,42E-03	0,014665
38,00	0,716407	160,4752	63,52476	6,23E-03	0,015742
38,50	0,72755	162,9713	61,0287	6,14E-03	0,016386
39,00	0,728161	163,108	60,892	6,13E-03	0,016423
39,50	0,718251	160,8882	63,11177	6,22E-03	0,015845
40,00	0,698663	156,5006	67,49938	6,39E-03	0,014815
40,50	0,67106	150,3175	73,68251	6,65E-03	0,013572
41,00	0,637691	142,8427	81,15726	7,00E-03	0,012322
41,50	0,601256	134,6813	89,31871	7,42E-03	0,011196
42,00	0,564571	126,4638	97,53618	7,91E-03	0,010253
42,50	0,530415	118,813	105,187	8,42E-03	0,009507
43,00	0,501146	112,2568	111,7432	8,91E-03	0,008949
43,50	0,478529	107,1905	116,8095	9,33E-03	0,008561
44,00	0,463533	103,8314	120,1686	9,63E-03	0,008322
44,50	0,456279	102,2065	121,7935	9,78E-03	0,008211
45,00	0,456085	102,1631	121,8369	9,79E-03	0,008208
45,50	0,461334	103,3387	120,6613	9,68E-03	0,008288
46,00	0,469901	105,2579	118,7421	9,50E-03	0,008422
46,50	0,479378	107,3807	116,6193	9,31E-03	0,008575
47,00	0,487191	109,1307	114,8693	9,16E-03	0,008706
47,50	0,491118	110,0104	113,9896	9,09E-03	0,008773
48,00	0,489625	109,6759	114,3241	9,12E-03	0,008747
48,50	0,481909	107,9476	116,0524	9,26E-03	0,008617
49,00	0,468226	104,8827	119,1173	9,53E-03	0,008395
49,50	0,449965	100,7923	123,2077	9,92E-03	0,008116
50,00	0,429187	96,13793	127,8621	1,04E-02	0,007821
50,50	0,408763	91,56281	132,4372	1,09E-02	0,007551
51,00	0,392125	87,83597	136,164	1,14E-02	0,007344
51,50	0,381825	85,52872	138,4713	1,17E-02	0,007222
52,00	0,38061	85,25671	138,7433	1,17E-02	0,007208
52,50	0,389335	87,21103	136,789	1,15E-02	0,007311
53,00	0,407481	91,27578	132,7242	1,10E-02	0,007534
53,50	0,433308	97,06089	126,9391	1,03E-02	0,007878
54,00	0,462985	103,7087	120,2913	9,64E-03	0,008313
54,50	0,49092	109,966	114,034	9,09E-03	0,008769
55,00	0,513589	115,0439	108,9561	8,69E-03	0,009178
55,50	0,525259	117,658	106,342	8,50E-03	0,009404
56,00	0,522682	117,0808	106,9192	8,54E-03	0,009353
56,50	0,505242	113,1743	110,8257	8,84E-03	0,009023
57,00	0,476903	106,8263	117,1737	9,36E-03	0,008534
57,50	0,443204	99,27766	124,7223	1,01E-02	0,008018
58,00	0,414019	92,74036	131,2596	1,08E-02	0,007618
58,50	0,401351	89,90257	134,0974	1,11E-02	0,007457
59,00	0,415967	93,17671	130,8233	1,07E-02	0,007644
59,50	0,463754	103,881	120,119	9,63E-03	0,008325
60,00	0,544788	122,0325	101,9675	8,19E-03	0,009807
60,50	0,647077	144,9452	79,05485	6,90E-03	0,012649
61,00	0,74788	167,5251	56,47492	5,97E-03	0,017707
61,50	0,815054	182,572	41,42796	5,48E-03	0,024138
62,00	0,820813	183,862	40,13798	5,44E-03	0,024914
62,50	0,748373	167,6355	56,36447	5,97E-03	0,017742
63,00	0,638598	143,046	80,95405	6,99E-03	0,012353
63,50	0,613304	137,3802	86,61984	7,28E-03	0,011545
64,00	0,931628	208,6847	15,31527	4,79E-03	0,065294

## Б.2 Численные результаты математического моделирования доступа к среде установления соединения

В результате математического моделирования получена зависимость коэффициента готовности  $F_{СУС.i}$  среды установления соединения  $СУС_i$  от качества физической среды на входах узлов  $(s, k)$ , взаимодействующих в физическом канале  $e_{УС.i} \in E_{УС}$ . В результате моделирования диапазон изменений показателя коэффициента готовности среды установления соединения составил:  $0.0062 \leq F_{СУС} \leq 0.578$  (таблица Б.2.1).

Таблица Б.2.1 – Коэффициент готовности среды установления соединения при последовательном уменьшении отношения сигнал/помеха

Номер отсчета	Интенсивность возникновения отказов	Интенсивность восстановления	Коэффициент готовности СУС	Интенсивность возникновения отказов СУС	Интенсивность Восстановления СУС
1	0,005871	0,018635	0,57827	0,011742	0,0161
2	0,00605	0,017035	0,544557	0,0121	0,014468
3	0,006249	0,015632	0,510375	0,012498	0,013028
4	0,006471	0,014397	0,475973	0,012942	0,011755
5	0,006718	0,013308	0,44161	0,013436	0,010626
6	0,006993	0,012346	0,407546	0,013986	0,009621
7	0,0073	0,011494	0,374039	0,0146	0,008724
8	0,007641	0,010738	0,341334	0,015282	0,007919
9	0,008022	0,010065	0,309664	0,016044	0,007197
10	0,008448	0,009467	0,279239	0,016896	0,006546
11	0,008924	0,008933	0,250245	0,017848	0,005957
12	0,009457	0,008456	0,222839	0,018914	0,005423
13	0,010054	0,008029	0,197146	0,020108	0,004938
14	0,010725	0,007647	0,173257	0,02145	0,004495
15	0,01148	0,007305	0,151231	0,02296	0,004091
16	0,01233	0,006998	0,131093	0,02466	0,00372
17	0,01329	0,006722	0,112836	0,02658	0,003381
18	0,014377	0,006475	0,096426	0,028754	0,003069
19	0,015609	0,006253	0,081803	0,031218	0,002781
20	0,017009	0,006053	0,068885	0,034018	0,002517
21	0,018606	0,005874	0,057572	0,037212	0,002273
22	0,02043	0,005713	0,047751	0,04086	0,002049
23	0,022519	0,005568	0,0393	0,045038	0,001842
24	0,02492	0,005439	0,032093	0,04984	0,001653
25	0,027686	0,005323	0,026001	0,055372	0,001478
26	0,030881	0,005219	0,020898	0,061762	0,001318
27	0,034586	0,005126	0,016661	0,069172	0,001172
28	0,038893	0,005043	0,013176	0,077786	0,001039
29	0,043916	0,004969	0,010334	0,087832	0,000917
30	0,049795	0,004904	0,008038	0,09959	0,000807
31	0,056697	0,004846	0,0062	0,113394	0,000707

Для исследования зависимости коэффициента готовности среды установления соединения, использовалась последовательность случайных нормальных значений интенсивностей отказов  $\lambda_{e_{УС}}^j$  и восстановлений  $\mu_{e_{УС}}^j$ , полученных на основе нормальной

последовательности исправного состояния канала  $\{P_{иск}\}$  (таблица Б.1.2, приложение Б.1).  
Численные результаты моделирования приведены в таблице Б.2.2.

Таблица Б.2.2 – Значения коэффициента готовности среды установления соединения в зависимости от прогнозируемых интенсивностей отказов и восстановлений при нормальном законе распределения отношения сигнал/помеха на интервале моделирования

Номер отсчета	Интенсивность возникновения отказов СУС	Интенсивность Восстановления СУС	Коэффициент готовности СУС
1	0,00446	1,25	0,992902
2	0,00446	1,25	0,992902
3	0,00483	0,059659	0,855817
4	0,0081	0,009951	0,303906
5	0,0108	0,007633	0,171481
6	0,00979	0,008203	0,207848
7	0,008	0,010096	0,31126
8	0,00706	0,012132	0,39961
9	0,00701	0,012301	0,40577
10	0,00779	0,010453	0,328318
11	0,00961	0,00834	0,215885
12	0,0129	0,006834	0,119929
13	0,0178	0,005954	0,062822
14	0,0228	0,005554	0,038366
15	0,023	0,005537	0,037644
16	0,0186	0,005877	0,057655
17	0,0137	0,006621	0,106158
18	0,0103	0,007892	0,188205
19	0,00812	0,009919	0,302353
20	0,00679	0,013048	0,432616
21	0,00598	0,017654	0,557978
22	0,0055	0,023636	0,65809
23	0,00527	0,02931	0,718425
24	0,0052	0,031544	0,736985
25	0,00527	0,029347	0,718703
26	0,00543	0,025066	0,675589
27	0,00567	0,020954	0,619422
28	0,00596	0,017782	0,560959
29	0,00626	0,015535	0,508059
30	0,00655	0,014003	0,464184
31	0,0068	0,012983	0,430695
32	0,007	0,012318	0,406587
33	0,00715	0,011885	0,389856
34	0,00726	0,011589	0,378021
35	0,00736	0,01135	0,368007
36	0,00746	0,01111	0,357931
37	0,0076	0,01083	0,345305
38	0,00777	0,010498	0,330243
39	0,00799	0,010125	0,312395
40	0,00824	0,009736	0,293342
41	0,00853	0,009364	0,273839
42	0,00882	0,009038	0,256142
43	0,00908	0,008783	0,241759
44	0,00926	0,008616	0,232315
45	0,00934	0,008549	0,228367
46	0,0093	0,008587	0,230478
47	0,00913	0,008736	0,239106
48	0,00886	0,008995	0,253804
49	0,00854	0,009358	0,273384
50	0,00819	0,00981	0,297033

51	0,00787	0,010322	0,321924
52	0,00759	0,010844	0,346052
53	0,00738	0,01131	0,366197
54	0,00724	0,011643	0,380179
55	0,00719	0,011775	0,385488
56	0,00723	0,011672	0,381313
57	0,00736	0,01135	0,368005
58	0,00758	0,010866	0,347015
59	0,00788	0,010298	0,320944
60	0,00826	0,009721	0,29229
61	0,00868	0,009194	0,26458
62	0,00911	0,008754	0,24013
63	0,0095	0,008424	0,220888
64	0,00977	0,008217	0,208699
65	0,00988	0,008141	0,204083
66	0,00979	0,008203	0,207858
67	0,00951	0,008414	0,22035
68	0,00908	0,008784	0,24179
69	0,00856	0,009331	0,272007
70	0,00802	0,010069	0,309848
71	0,00751	0,011008	0,353369
72	0,00706	0,012135	0,399675
73	0,0067	0,013396	0,444352
74	0,00642	0,014665	0,483755
75	0,00623	0,015742	0,513309
76	0,00614	0,016386	0,529144
77	0,00613	0,016423	0,530261
78	0,00622	0,015845	0,515674
79	0,00639	0,014815	0,488119
80	0,00665	0,013572	0,450437
81	0,007	0,012322	0,406679
82	0,00742	0,011196	0,3617
83	0,00791	0,010253	0,318649
84	0,00842	0,009507	0,281233
85	0,00891	0,008949	0,251096
86	0,00933	0,008561	0,228969
87	0,00963	0,008322	0,214887
88	0,00978	0,008211	0,208286
89	0,00979	0,008208	0,207974
90	0,00968	0,008288	0,212756
91	0,0095	0,008422	0,220819
92	0,00931	0,008575	0,229872
93	0,00916	0,008706	0,237443
94	0,00909	0,008773	0,241198
95	0,00912	0,008747	0,239673
96	0,00926	0,008617	0,232334
97	0,00953	0,008395	0,219345
98	0,00992	0,008116	0,2025
99	0,0104	0,007821	0,184236
100	0,0109	0,007551	0,167476
101	0,0114	0,007344	0,153514
102	0,0117	0,007222	0,145666
103	0,0117	0,007208	0,145313
104	0,0115	0,007311	0,151041
105	0,011	0,007534	0,16525
106	0,0103	0,007878	0,187814
107	0,00964	0,008313	0,214413
108	0,00909	0,008769	0,241103
109	0,00869	0,009178	0,263842
110	0,0085	0,009404	0,275873

111	0,00854	0,009353	0,273231
112	0,00884	0,009023	0,255154
113	0,00936	0,008534	0,227462
114	0,0101	0,008018	0,195839
115	0,0108	0,007618	0,171092
116	0,0111	0,007457	0,161485
117	0,0107	0,007644	0,173639
118	0,00963	0,008325	0,214982
119	0,00819	0,009807	0,296944
120	0,0069	0,012649	0,418672
121	0,00597	0,017707	0,559289
122	0,00548	0,024138	0,664191
123	0,00544	0,024914	0,673683
124	0,00597	0,017742	0,559841
125	0,00699	0,012353	0,407839
126	0,00728	0,011545	0,376105

Таблица Б.2.3 Минимальные, максимальные, средние значения и среднеквадратическое отклонение интенсивностей отказов, восстановлений и коэффициента готовности среды установления соединения

	Интенсивность возникновения отказов СУС	Интенсивность восстановления СУС	Коэффициент готовности СУС
Максимальное значение	0,023	0,059659	0,855817
Минимальное значение	0,00483	0,005537	0,037644
Среднее значение	0,008706	0,011524	0,322184
СКО	0,002802	0,006497	0,157165

### Б.3 Численные результаты математического моделирования надежности трассы установления соединения

Зависимость коэффициента готовности трассы установления соединения от интенсивности отказов среды установления соединения при  $10 \leq Z \leq 40$  дБ, где количество каналов, используемых при формировании трассы установления соединения, составило:  $r = \{1, 2, 4, 6, 8\}$ . Численные результаты математического моделирования приведены в таблице Б.3.1.

Таблица Б.3.1 – Коэффициенты готовности трассы установления соединения

Номер	Интенсивность отказов канала	Интенсивность восстановления канала	Коэффициент готовности СУС	Интенсивность отказов СУС	Интенсивность восстановления СУС
1	0,005871	0,018635	0,57827	0,011741	0,0161
2	0,00605	0,017035	0,544557	0,012099	0,014467
3	0,006249	0,015632	0,510375	0,012498	0,013028
4	0,006471	0,014397	0,475973	0,012942	0,011755
5	0,006718	0,013308	0,44161	0,013436	0,010626
6	0,006993	0,012346	0,407546	0,013986	0,009621
7	0,0073	0,011494	0,374039	0,014599	0,008724
8	0,007641	0,010738	0,341334	0,015282	0,00792
9	0,008022	0,010065	0,309664	0,016045	0,007197
10	0,008448	0,009467	0,279239	0,016896	0,006546
11	0,008924	0,008933	0,250245	0,017848	0,005957
12	0,009457	0,008456	0,222839	0,018914	0,005423
13	0,010054	0,008029	0,197146	0,020109	0,004938
14	0,010725	0,007647	0,173257	0,02145	0,004495
15	0,01148	0,007305	0,151231	0,022959	0,004091

16	0,01233	0,006998	0,131093	0,02466	0,00372
17	0,01329	0,006722	0,112836	0,02658	0,003381
18	0,014377	0,006475	0,096426	0,028753	0,003068
19	0,015609	0,006253	0,081803	0,031217	0,002781
20	0,017009	0,006053	0,068885	0,034019	0,002517
21	0,018606	0,005874	0,057572	0,037212	0,002273
22	0,02043	0,005713	0,047751	0,040859	0,002049
23	0,022519	0,005568	0,0393	0,045038	0,001842
24	0,02492	0,005439	0,032093	0,04984	0,001653
25	0,027686	0,005323	0,026001	0,055371	0,001478
26	0,030881	0,005219	0,020898	0,061763	0,001318
27	0,034586	0,005126	0,016661	0,069171	0,001172
28	0,038893	0,005043	0,013176	0,077785	0,001039
29	0,043916	0,004969	0,010334	0,087832	0,000917
30	0,049795	0,004904	0,008038	0,099589	0,000807
31	0,056697	0,004846	0,0062	0,113393	0,000707

Продолжение таблицы Б.3.1 – Коэффициенты готовности трассы установления соединения

Номер	Коэффициент готовности ТУС при r - количестве попыток (каналов)				
	r=1	r=2	r=4	r=6	r=8
1	0,822144	0,924993	0,968367	0,986660	0,994374
2	0,792572	0,905528	0,956974	0,980404	0,991075
3	0,760267	0,882621	0,942528	0,971860	0,986222
4	0,725396	0,856100	0,924592	0,960484	0,979293
5	0,688201	0,825894	0,902781	0,945714	0,969687
6	0,648999	0,792048	0,876798	0,927009	0,956756
7	0,608172	0,754731	0,846471	0,903897	0,939843
8	0,566159	0,714243	0,811782	0,876027	0,918343
9	0,523436	0,671010	0,772886	0,843215	0,891766
10	0,480504	0,625567	0,730123	0,805483	0,859800
11	0,437868	0,578539	0,684008	0,763083	0,822370
12	0,396021	0,530612	0,635210	0,716499	0,779675
13	0,355426	0,482501	0,584524	0,666433	0,732195
14	0,316496	0,434918	0,532823	0,613765	0,680683
15	0,279591	0,388539	0,481011	0,559499	0,626116
16	0,245000	0,343975	0,429975	0,504701	0,569631
17	0,212940	0,301749	0,380537	0,450435	0,512445
18	0,183555	0,262282	0,333417	0,397693	0,455772
19	0,156915	0,225882	0,289208	0,347353	0,400742
20	0,133025	0,192746	0,248354	0,300131	0,348342
21	0,111829	0,162963	0,211152	0,256568	0,299368
22	0,093221	0,136521	0,177753	0,217016	0,254404
23	0,077056	0,113328	0,148175	0,181652	0,213813
24	0,063157	0,093223	0,122325	0,150492	0,177756
25	0,051327	0,075994	0,100019	0,123420	0,146212
26	0,041360	0,061393	0,081009	0,100214	0,119018
27	0,033045	0,049156	0,064998	0,080577	0,095896
28	0,026178	0,039008	0,051670	0,064165	0,076495
29	0,020561	0,030682	0,040699	0,050612	0,060423
30	0,016011	0,023920	0,031766	0,039548	0,047268
31	0,012361	0,018485	0,024570	0,030618	0,036628

Для исследования зависимости коэффициента готовности трассы установления соединения, использовалась последовательность интенсивностей отказов среды установления соединения  $\{\lambda_{СУС.i}\}$  (таблица Б.2.2, приложение Б.2). Численные результаты математического моделирования приведены в таблице Б.3.2 (приложение Б.3).

Таблица Б.3.2 – Коэффициенты готовности трассы установления соединения, полученный математическим моделированием на интервале случайной последовательности

Номер	Интенсивность отказов канала	Интенсивность восстановления канала	Коэффициент готовности СУС	Интенсивность отказов СУС	Интенсивность восстановления СУС
1	0,00446	1,25	0,992902	0,00892	1,247774
2	0,00446	1,25	0,992902	0,00892	1,247774
3	0,00483	0,059659	0,855817	0,00966	0,057338
4	0,0081	0,009951	0,303906	0,0162	0,007073
5	0,0108	0,007633	0,171481	0,0216	0,004471
6	0,00979	0,008203	0,207848	0,01958	0,005137
7	0,008	0,010096	0,31126	0,016	0,007231
8	0,00706	0,012132	0,39961	0,01412	0,009398
9	0,00701	0,012301	0,40577	0,01402	0,009574
10	0,00779	0,010453	0,328318	0,01558	0,007615
11	0,00961	0,00834	0,215885	0,01922	0,005292
12	0,0129	0,006834	0,119929	0,0258	0,003516
13	0,0178	0,005954	0,062822	0,0356	0,002386
14	0,0228	0,005554	0,038366	0,0456	0,001819
15	0,023	0,005537	0,037644	0,046	0,001799
16	0,0186	0,005877	0,057655	0,0372	0,002276
17	0,0137	0,006621	0,106158	0,0274	0,003254
18	0,0103	0,007892	0,188205	0,0206	0,004776
19	0,00812	0,009919	0,302353	0,01624	0,007038
20	0,00679	0,013048	0,432616	0,01358	0,010354
21	0,00598	0,017654	0,557978	0,01196	0,015097
22	0,0055	0,023636	0,65809	0,011	0,021172
23	0,00527	0,02931	0,718425	0,01054	0,026892
24	0,0052	0,031544	0,736985	0,0104	0,029142
25	0,00527	0,029347	0,718703	0,01054	0,026929
26	0,00543	0,025066	0,675589	0,01086	0,022616
27	0,00567	0,020954	0,619422	0,01134	0,018457
28	0,00596	0,017782	0,560959	0,01192	0,01523
29	0,00626	0,015535	0,508059	0,01252	0,01293
30	0,00655	0,014003	0,464184	0,0131	0,011349
31	0,0068	0,012983	0,430695	0,0136	0,010289
32	0,007	0,012318	0,406587	0,014	0,009592
33	0,00715	0,011885	0,389856	0,0143	0,009137
34	0,00726	0,011589	0,378021	0,01452	0,008825
35	0,00736	0,01135	0,368007	0,01472	0,008571
36	0,00746	0,01111	0,357931	0,01492	0,008317
37	0,0076	0,01083	0,345305	0,0152	0,008017
38	0,00777	0,010498	0,330243	0,01554	0,007662
39	0,00799	0,010125	0,312395	0,01598	0,00726
40	0,00824	0,009736	0,293342	0,01648	0,006841
41	0,00853	0,009364	0,273839	0,01706	0,006433
42	0,00882	0,009038	0,256142	0,01764	0,006074
43	0,00908	0,008783	0,241759	0,01816	0,00579
44	0,00926	0,008616	0,232315	0,01852	0,005604
45	0,00934	0,008549	0,228367	0,01868	0,005528
46	0,0093	0,008587	0,230478	0,0186	0,005571
47	0,00913	0,008736	0,239106	0,01826	0,005738
48	0,00886	0,008995	0,253804	0,01772	0,006027
49	0,00854	0,009358	0,273384	0,01708	0,006426
50	0,00819	0,00981	0,297033	0,01638	0,006921
51	0,00787	0,010322	0,321924	0,01574	0,007473
52	0,00759	0,010844	0,346052	0,01518	0,008033
53	0,00738	0,01131	0,366197	0,01476	0,008528
54	0,00724	0,011643	0,380179	0,01448	0,008882
55	0,00719	0,011775	0,385488	0,01438	0,009021
56	0,00723	0,011672	0,381313	0,01446	0,008912
57	0,00736	0,01135	0,368005	0,01472	0,008571
58	0,00758	0,010866	0,347015	0,01516	0,008056
59	0,00788	0,010298	0,320944	0,01576	0,007449
60	0,00826	0,009721	0,29229	0,01652	0,006823
61	0,00868	0,009194	0,26458	0,01736	0,006246
62	0,00911	0,008754	0,24013	0,01822	0,005758
63	0,0095	0,008424	0,220888	0,019	0,005387
64	0,00977	0,008217	0,208699	0,01954	0,005154
65	0,00988	0,008141	0,204083	0,01976	0,005067
66	0,00979	0,008203	0,207858	0,01958	0,005138

67	0,00951	0,008414	0,22035	0,01902	0,005376
68	0,00908	0,008784	0,24179	0,01816	0,005791
69	0,00856	0,009331	0,272007	0,01712	0,006397
70	0,00802	0,010069	0,309848	0,01604	0,007201
71	0,00751	0,011008	0,353369	0,01502	0,008208
72	0,00706	0,012135	0,399675	0,01412	0,009401
73	0,0067	0,013396	0,444352	0,0134	0,010716
74	0,00642	0,014665	0,483755	0,01284	0,012032
75	0,00623	0,015742	0,513309	0,01246	0,013141
76	0,00614	0,016386	0,529144	0,01228	0,0138
77	0,00613	0,016423	0,530261	0,01226	0,01384
78	0,00622	0,015845	0,515674	0,01244	0,013245
79	0,00639	0,014815	0,488119	0,01278	0,012187
80	0,00665	0,013572	0,450437	0,0133	0,010901
81	0,007	0,012322	0,406679	0,014	0,009596
82	0,00742	0,011196	0,3617	0,01484	0,008409
83	0,00791	0,010253	0,318649	0,01582	0,007399
84	0,00842	0,009507	0,281233	0,01684	0,006589
85	0,00891	0,008949	0,251096	0,01782	0,005975
86	0,00933	0,008561	0,228969	0,01866	0,005541
87	0,00963	0,008322	0,214887	0,01926	0,005271
88	0,00978	0,008211	0,208286	0,01956	0,005146
89	0,00979	0,008208	0,207974	0,01958	0,005141
90	0,00968	0,008288	0,212756	0,01936	0,005232
91	0,0095	0,008422	0,220819	0,019	0,005385
92	0,00931	0,008575	0,229872	0,01862	0,005558
93	0,00916	0,008706	0,237443	0,01832	0,005704
94	0,00909	0,008773	0,241198	0,01818	0,005779
95	0,00912	0,008747	0,239673	0,01824	0,00575
96	0,00926	0,008617	0,232334	0,01852	0,005605
97	0,00953	0,008395	0,219345	0,01906	0,005355
98	0,00992	0,008116	0,2025	0,01984	0,005038
99	0,0104	0,007821	0,184236	0,0208	0,004698
100	0,0109	0,007551	0,167476	0,0218	0,004385
101	0,0114	0,007344	0,153514	0,0228	0,004135
102	0,0117	0,007222	0,145666	0,0234	0,00399
103	0,0117	0,007208	0,145313	0,0234	0,003978
104	0,0115	0,007311	0,151041	0,023	0,004092
105	0,011	0,007534	0,16525	0,022	0,004355
106	0,0103	0,007878	0,187814	0,0206	0,004764
107	0,00964	0,008313	0,214413	0,01928	0,005262
108	0,00909	0,008769	0,241103	0,01818	0,005776
109	0,00869	0,009178	0,263842	0,01738	0,006229
110	0,0085	0,009404	0,275873	0,017	0,006477
111	0,00854	0,009353	0,273231	0,01708	0,006421
112	0,00884	0,009023	0,255154	0,01768	0,006056
113	0,00936	0,008534	0,227462	0,01872	0,005512
114	0,0101	0,008018	0,195839	0,0202	0,004919
115	0,0108	0,007618	0,171092	0,0216	0,004458
116	0,0111	0,007457	0,161485	0,0222	0,004275
117	0,0107	0,007644	0,173639	0,0214	0,004497
118	0,00963	0,008325	0,214982	0,01926	0,005274
119	0,00819	0,009807	0,296944	0,01638	0,006918
120	0,0069	0,012649	0,418672	0,0138	0,009939
121	0,00597	0,017707	0,559289	0,01194	0,015153
122	0,00548	0,024138	0,664191	0,01096	0,021678
123	0,00544	0,024914	0,673683	0,01088	0,022462
124	0,00597	0,017742	0,559841	0,01194	0,015187
125	0,00699	0,012353	0,407839	0,01398	0,009628
126	0,00728	0,011545	0,376105	0,01456	0,008777
127	0,00479	0,065294	0,867979	0,00958	0,062984

Продолжение таблицы Б.3.2 – Коэффициенты готовности трассы установления соединения, полученный математическим моделированием на интервале случайной последовательности

Номер	Коэффициент готовности ТУС; r – количество попыток (каналов)				
	r=1	r=2	r=4	r=6	r=8
1	0,999950	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
2	0,999950	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
3	0,979211	0,997003	0,999568	0,999938	0,999991
4	0,515453	0,662710	0,765214	0,836567	0,886235

5	0,313556	0,431268	0,528795	0,609597	0,676544
6	0,372495	0,502920	0,606237	0,688080	0,752911
7	0,525637	0,673287	0,774980	0,845020	0,893259
8	0,639532	0,783578	0,870063	0,921987	0,953162
9	0,646891	0,790172	0,875314	0,925908	0,955972
10	0,548843	0,696966	0,796457	0,863284	0,908170
11	0,385164	0,517898	0,621977	0,703587	0,767578
12	0,225475	0,318363	0,400111	0,472055	0,535371
13	0,121697	0,176874	0,228584	0,277046	0,322463
14	0,075261	0,110740	0,144857	0,177666	0,209216
15	0,073872	0,108735	0,142286	0,174574	0,205647
16	0,111987	0,163185	0,211432	0,256897	0,299741
17	0,201046	0,285862	0,361673	0,429437	0,490006
18	0,340988	0,465017	0,565704	0,647440	0,713794
19	0,513289	0,660448	0,763113	0,834736	0,884704
20	0,678075	0,817345	0,896364	0,941199	0,966637
21	0,804616	0,913636	0,961825	0,983126	0,992541
22	0,883097	0,960030	0,986334	0,995327	0,998402
23	0,920716	0,977675	0,993714	0,998230	0,999502
24	0,930823	0,981805	0,995215	0,998741	0,999669
25	0,920872	0,977742	0,993739	0,998239	0,999505
26	0,894758	0,965858	0,988924	0,996407	0,998834
27	0,855160	0,944877	0,979021	0,992016	0,996961
28	0,807243	0,915372	0,962845	0,983687	0,992838
29	0,757994	0,880947	0,941433	0,971189	0,985826
30	0,712901	0,846168	0,917574	0,955835	0,976336
31	0,675892	0,815484	0,894954	0,940197	0,965954
32	0,647861	0,791036	0,875998	0,926416	0,956334
33	0,627725	0,772859	0,861411	0,915441	0,948407
34	0,613142	0,759382	0,850341	0,906915	0,942103
35	0,600585	0,747572	0,840467	0,899176	0,936280
36	0,587747	0,735305	0,830048	0,890879	0,929937
37	0,571374	0,719380	0,816280	0,879719	0,921253
38	0,551425	0,699564	0,798781	0,865232	0,909738
39	0,527200	0,674901	0,776460	0,846293	0,894310
40	0,500635	0,647120	0,750635	0,823784	0,875476
41	0,472690	0,617088	0,721944	0,798087	0,853378
42	0,446675	0,588405	0,693832	0,772254	0,830590
43	0,425070	0,564064	0,669456	0,749368	0,809960
44	0,410660	0,547572	0,652678	0,733366	0,795309
45	0,404583	0,540557	0,645478	0,726440	0,788912
46	0,407836	0,544317	0,649342	0,730161	0,792353
47	0,421040	0,559473	0,664806	0,744953	0,805936
48	0,443191	0,584511	0,689964	0,768652	0,827369
49	0,472029	0,616368	0,721246	0,797453	0,852826
50	0,505837	0,652620	0,755803	0,828338	0,879327
51	0,540212	0,688229	0,788595	0,856652	0,902799
52	0,572352	0,720340	0,817117	0,880404	0,921790
53	0,598294	0,745397	0,838632	0,897724	0,935177
54	0,615822	0,761878	0,852407	0,908519	0,943298
55	0,622374	0,767944	0,857399	0,912370	0,946150
56	0,617227	0,763183	0,853485	0,909353	0,943918
57	0,600582	0,747570	0,840465	0,899175	0,936279
58	0,573610	0,721574	0,818192	0,881282	0,922479
59	0,538883	0,686875	0,787371	0,855613	0,901953
60	0,499147	0,645541	0,749146	0,822468	0,874359
61	0,459157	0,602253	0,707489	0,784882	0,841798
62	0,422598	0,561250	0,666607	0,746665	0,807498
63	0,392984	0,527067	0,631532	0,712922	0,776334
64	0,373843	0,504521	0,607927	0,689753	0,754501

65	0,366517	0,495800	0,598699	0,680598	0,745782
66	0,372511	0,502939	0,606257	0,688100	0,752930
67	0,392146	0,526086	0,630513	0,711930	0,775406
68	0,425118	0,564118	0,669510	0,749419	0,810007
69	0,470026	0,614182	0,719127	0,795527	0,851145
70	0,523690	0,671274	0,773129	0,843425	0,891939
71	0,581868	0,729623	0,825165	0,886946	0,926896
72	0,639610	0,783649	0,870119	0,922029	0,953192
73	0,691256	0,828447	0,904677	0,947034	0,970570
74	0,733491	0,862416	0,928973	0,963333	0,981071
75	0,763132	0,884719	0,943894	0,972694	0,986710
76	0,778295	0,895609	0,950847	0,976856	0,989102
77	0,779345	0,896350	0,951311	0,977129	0,989257
78	0,765428	0,886391	0,944976	0,973350	0,987093
79	0,737978	0,865876	0,931344	0,964857	0,982011
80	0,697980	0,834021	0,908784	0,949871	0,972451
81	0,647970	0,791134	0,876075	0,926473	0,956375
82	0,592573	0,739940	0,834004	0,894045	0,932369
83	0,535760	0,683690	0,784482	0,853156	0,899948
84	0,483374	0,628667	0,733098	0,808160	0,862112
85	0,439142	0,579971	0,685439	0,764424	0,823576
86	0,405511	0,541631	0,646583	0,727505	0,789898
87	0,383597	0,516054	0,620048	0,701694	0,765796
88	0,373189	0,503745	0,607107	0,688941	0,753730
89	0,372694	0,503158	0,606488	0,688328	0,753148
90	0,380246	0,512102	0,615905	0,697624	0,761956
91	0,392877	0,526941	0,631402	0,712795	0,776215
92	0,406902	0,543239	0,648235	0,729096	0,791369
93	0,418507	0,556578	0,661866	0,742153	0,803377
94	0,424220	0,563097	0,668477	0,748440	0,809116
95	0,421902	0,560456	0,665803	0,745901	0,806801
96	0,410689	0,547605	0,652712	0,733399	0,795339
97	0,390578	0,524251	0,628604	0,710068	0,773663
98	0,363994	0,492786	0,595497	0,677409	0,742733
99	0,334530	0,457134	0,557149	0,638739	0,705296
100	0,306903	0,422980	0,519617	0,600070	0,667048
101	0,283461	0,393459	0,486572	0,565390	0,632108
102	0,270114	0,376434	0,467267	0,544868	0,611166
103	0,269511	0,375660	0,466385	0,543927	0,610200
104	0,279269	0,388129	0,480547	0,559006	0,625614
105	0,303193	0,418340	0,514459	0,594695	0,661672
106	0,340353	0,464244	0,564866	0,646590	0,712965
107	0,382852	0,515177	0,619129	0,700792	0,764946
108	0,424075	0,562932	0,668310	0,748281	0,808971
109	0,458072	0,601056	0,706314	0,783801	0,840843
110	0,475639	0,620296	0,725046	0,800898	0,855825
111	0,471806	0,616125	0,721011	0,797240	0,852640
112	0,445204	0,586762	0,692201	0,770737	0,829234
113	0,403185	0,538937	0,643812	0,724831	0,787421
114	0,353326	0,479970	0,581812	0,663710	0,729569
115	0,312911	0,430467	0,527909	0,608680	0,675632
116	0,296892	0,410433	0,505639	0,585471	0,652411
117	0,317127	0,435700	0,533685	0,614655	0,681566
118	0,383747	0,516230	0,620232	0,701875	0,765966
119	0,505712	0,652488	0,755679	0,828229	0,879235
120	0,662058	0,803545	0,885795	0,933610	0,961405
121	0,805774	0,914402	0,962276	0,983375	0,992673
122	0,887232	0,962132	0,987283	0,995730	0,998566
123	0,893517	0,965253	0,988661	0,996300	0,998793
124	0,806260	0,914724	0,962465	0,983479	0,992728

125	0,649346	0,792356	0,877042	0,927189	0,956884
126	0,610755	0,757152	0,848488	0,905473	0,941025
127	0,982570	0,997699	0,999696	0,999960	0,999995

Таблица Б.3.3 Интенсивности отказов и восстановлений трассы установления соединения, полученные в результате математического моделирования на интервале случайной последовательности

Номер	Интенсивность отказов ТУС; $r$ – количество попыток (каналов)				
	$r=1$	$r=2$	$r=4$	$r=6$	$r=8$
1	0,004464	0,004464	0,004464	0,004464	0,004464
2	0,004464	0,004464	0,004464	0,004464	0,004464
3	0,004519	0,004467	0,004464	0,004464	0,004464
4	0,008023	0,005976	0,005111	0,004723	0,004558
5	0,0134	0,009259	0,007257	0,006124	0,005439
6	0,011203	0,007876	0,006307	0,005458	0,004981
7	0,007866	0,005888	0,005062	0,004697	0,004546
8	0,006478	0,005159	0,00469	0,004529	0,00448
9	0,006407	0,005125	0,004675	0,004523	0,004478
10	0,007532	0,005704	0,004961	0,004647	0,004524
11	0,010821	0,007639	0,006149	0,005353	0,004913
12	0,01888	0,012802	0,009798	0,008031	0,006889
13	0,035672	0,023885	0,018002	0,014481	0,012142
14	0,058265	0,038905	0,029228	0,023425	0,019559
15	0,05938	0,039646	0,029783	0,023868	0,019928
16	0,038844	0,025991	0,019573	0,015729	0,013174
17	0,021264	0,014363	0,010941	0,008915	0,007592
18	0,01228	0,00855	0,006765	0,005774	0,005192
19	0,008057	0,005995	0,005122	0,004729	0,00456
20	0,006125	0,004994	0,004619	0,004504	0,004473
21	0,005246	0,00464	0,004498	0,00447	0,004465
22	0,004861	0,004527	0,004472	0,004465	0,004464
23	0,004711	0,004495	0,004467	0,004465	0,004464
24	0,004674	0,004488	0,004466	0,004464	0,004464
25	0,00471	0,004495	0,004467	0,004465	0,004464
26	0,004812	0,004516	0,00447	0,004465	0,004464
27	0,004986	0,00456	0,004479	0,004466	0,004464
28	0,005231	0,004635	0,004496	0,004469	0,004465
29	0,005528	0,004741	0,004527	0,004476	0,004466
30	0,005845	0,00487	0,004572	0,004488	0,004469
31	0,006144	0,005002	0,004623	0,004505	0,004473
32	0,006398	0,005121	0,004673	0,004523	0,004478
33	0,006596	0,005217	0,004716	0,004539	0,004483
34	0,006749	0,005293	0,004752	0,004553	0,004488
35	0,006887	0,005363	0,004786	0,004567	0,004493
36	0,007035	0,00544	0,004823	0,004584	0,004499
37	0,007235	0,005545	0,004877	0,004607	0,004508
38	0,007496	0,005685	0,00495	0,004642	0,004522
39	0,007843	0,005875	0,005054	0,004694	0,004544
40	0,008264	0,006113	0,005189	0,004765	0,004577
41	0,008763	0,0064	0,005359	0,00486	0,004625
42	0,009286	0,006708	0,005548	0,004971	0,004685
43	0,009773	0,006999	0,005732	0,005084	0,004749
44	0,010127	0,007214	0,00587	0,005171	0,0048
45	0,010284	0,00731	0,005932	0,005211	0,004824
46	0,010199	0,007258	0,005899	0,005189	0,004811
47	0,009869	0,007058	0,005769	0,005107	0,004762
48	0,009361	0,006753	0,005576	0,004988	0,004694
49	0,008775	0,006407	0,005364	0,004862	0,004626
50	0,008178	0,006064	0,005161	0,00475	0,00457

51	0,007652	0,00577	0,004996	0,004665	0,004532
52	0,007223	0,005538	0,004873	0,004606	0,004508
53	0,006913	0,005377	0,004792	0,00457	0,004494
54	0,00672	0,005279	0,004745	0,00455	0,004487
55	0,006651	0,005244	0,004729	0,004544	0,004485
56	0,006705	0,005271	0,004741	0,004549	0,004487
57	0,006887	0,005363	0,004786	0,004567	0,004493
58	0,007207	0,00553	0,004869	0,004604	0,004507
59	0,007671	0,005781	0,005002	0,004667	0,004533
60	0,008289	0,006127	0,005198	0,004769	0,004579
61	0,009027	0,006555	0,005454	0,004915	0,004654
62	0,009832	0,007035	0,005755	0,005098	0,004757
63	0,010598	0,007502	0,006058	0,005293	0,004875
64	0,011161	0,00785	0,006289	0,005447	0,004973
65	0,011393	0,007994	0,006386	0,005512	0,005016
66	0,011203	0,007875	0,006307	0,005458	0,004981
67	0,010622	0,007517	0,006068	0,005299	0,004879
68	0,009771	0,006999	0,005732	0,005083	0,004748
69	0,008813	0,00643	0,005377	0,00487	0,00463
70	0,007896	0,005905	0,005071	0,004702	0,004548
71	0,007106	0,005476	0,004842	0,004592	0,004502
72	0,006477	0,005159	0,00469	0,004529	0,00448
73	0,006015	0,004944	0,0046	0,004497	0,004471
74	0,005694	0,004807	0,004549	0,004482	0,004467
75	0,005494	0,004729	0,004523	0,004475	0,004466
76	0,0054	0,004694	0,004513	0,004473	0,004466
77	0,005393	0,004691	0,004512	0,004473	0,004466
78	0,00548	0,004723	0,004522	0,004475	0,004466
79	0,005662	0,004795	0,004545	0,004481	0,004467
80	0,005961	0,00492	0,00459	0,004494	0,00447
81	0,006396	0,00512	0,004673	0,004522	0,004478
82	0,006979	0,00541	0,004809	0,004577	0,004497
83	0,007716	0,005805	0,005016	0,004674	0,004536
84	0,008565	0,006285	0,005291	0,004821	0,004605
85	0,00945	0,006806	0,00561	0,005008	0,004705
86	0,01026	0,007295	0,005923	0,005205	0,004821
87	0,010867	0,007668	0,006168	0,005365	0,004921
88	0,011182	0,007862	0,006298	0,005452	0,004977
89	0,011197	0,007872	0,006304	0,005457	0,00498
90	0,010966	0,007729	0,006209	0,005393	0,004938
91	0,010601	0,007504	0,00606	0,005294	0,004876
92	0,010223	0,007273	0,005908	0,005195	0,004815
93	0,009931	0,007095	0,005793	0,005122	0,004771
94	0,009793	0,007012	0,00574	0,005089	0,004751
95	0,009848	0,007045	0,005761	0,005102	0,004759
96	0,010126	0,007213	0,00587	0,005171	0,0048
97	0,010666	0,007544	0,006086	0,005311	0,004886
98	0,011475	0,008045	0,006421	0,005536	0,005031
99	0,012527	0,008705	0,006872	0,005849	0,005244
100	0,013702	0,009451	0,007392	0,006222	0,005509
101	0,014883	0,010208	0,007927	0,006615	0,005798
102	0,015649	0,010702	0,00828	0,006877	0,005995
103	0,015685	0,010726	0,008296	0,00689	0,006005
104	0,015116	0,010358	0,008034	0,006694	0,005857
105	0,013877	0,009563	0,00747	0,006279	0,005551
106	0,012304	0,008565	0,006775	0,005781	0,005197
107	0,010889	0,007681	0,006177	0,005371	0,004925
108	0,009796	0,007014	0,005741	0,005089	0,004752
109	0,009049	0,006568	0,005462	0,004919	0,004656
110	0,008707	0,006368	0,00534	0,004849	0,004619

111	0,008779	0,00641	0,005365	0,004863	0,004627
112	0,009318	0,006727	0,00556	0,004978	0,004688
113	0,010321	0,007332	0,005947	0,00522	0,00483
114	0,011835	0,00827	0,006573	0,005641	0,005101
115	0,013428	0,009277	0,007269	0,006133	0,005445
116	0,014183	0,009759	0,007609	0,00638	0,005624
117	0,013243	0,009159	0,007187	0,006074	0,005403
118	0,010863	0,007665	0,006166	0,005364	0,00492
119	0,00818	0,006065	0,005162	0,00475	0,00457
120	0,006266	0,005058	0,004646	0,004513	0,004475
121	0,005239	0,004638	0,004497	0,004469	0,004465
122	0,004843	0,004523	0,004472	0,004465	0,004464
123	0,004817	0,004517	0,004471	0,004465	0,004464
124	0,005237	0,004637	0,004497	0,004469	0,004465
125	0,006383	0,005114	0,00467	0,004521	0,004478
126	0,006774	0,005306	0,004758	0,004556	0,004489
127	0,004509	0,004467	0,004464	0,004464	0,004464

Продолжение таблицы Б.3.3 Интенсивности отказов и восстановлений трассы установления соединения, полученные в результате математического моделирования на интервале случайной последовательности

Номер	Интенсивность восстановления ТУС; $r$ – количество попыток (каналов)				
	$r= 1$	$r= 2$	$r= 4$	$r= 6$	$r= 8$
1	87,983	24615	8263828	4,14E+09	-
2	87,983	24615	8263828	4,14E+09	-
3	0,186015	2,209713	31,47935	667,3206	18484,5
4	0,005032	0,005882	0,007056	0,01164	0,024211
5	0,003347	0,002874	0,00232	0,002353	0,002769
6	0,003711	0,003435	0,003056	0,003502	0,004784
7	0,005161	0,006153	0,007567	0,012851	0,027598
8	0,007181	0,011047	0,01854	0,044709	0,139365
9	0,007362	0,011543	0,01981	0,048948	0,156477
10	0,005481	0,006846	0,008924	0,016217	0,037488
11	0,0038	0,00358	0,003259	0,003842	0,005432
12	0,002923	0,002285	0,00164	0,001436	0,001409
13	0,002551	0,00183	0,001187	0,000922	0,000784
14	0,002417	0,001681	0,001054	0,000788	0,000643
15	0,002414	0,001677	0,00105	0,000784	0,000639
16	0,002522	0,001797	0,001157	0,000891	0,00075
17	0,002825	0,002159	0,001508	0,001278	0,001204
18	0,003507	0,003114	0,002626	0,002812	0,003538
19	0,005005	0,005827	0,006953	0,0114	0,023553
20	0,008231	0,014041	0,026586	0,073035	0,260371
21	0,014981	0,039311	0,119988	0,541581	3,19088
22	0,027363	0,106823	0,494348	3,398825	30,52919
23	0,042685	0,219304	1,343796	12,24575	145,808
24	0,049793	0,280535	1,887483	18,88941	247,0045
25	0,04278	0,220093	1,350488	12,32368	146,9379
26	0,03089	0,130146	0,651367	4,845214	47,08821
27	0,021324	0,070901	0,277848	1,615707	12,2724
28	0,015224	0,040392	0,124752	0,569905	3,398593
29	0,011604	0,025457	0,063992	0,236667	1,141129
30	0,00945	0,017861	0,03803	0,1183	0,478759
31	0,008165	0,013842	0,026024	0,070953	0,250993
32	0,007387	0,01161	0,019985	0,049541	0,158902
33	0,006907	0,010315	0,016711	0,038772	0,116106
34	0,006594	0,009504	0,014756	0,032667	0,093148
35	0,006345	0,008878	0,0133	0,028296	0,077388
36	0,006108	0,008298	0,011995	0,02452	0,064284

37	0,005829	0,007636	0,010559	0,020528	0,051022
38	0,005519	0,00693	0,009094	0,016653	0,038814
39	0,005182	0,006197	0,007649	0,01305	0,028164
40	0,004855	0,005519	0,006391	0,010112	0,020086
41	0,004551	0,00492	0,005346	0,007838	0,014289
42	0,004299	0,004449	0,004569	0,006257	0,010551
43	0,004109	0,004109	0,004037	0,005235	0,008285
44	0,003992	0,003904	0,003728	0,004667	0,007087
45	0,003944	0,003823	0,003608	0,004451	0,006644
46	0,00397	0,003866	0,003672	0,004565	0,006877
47	0,004076	0,00405	0,003947	0,005068	0,007927
48	0,004267	0,004391	0,004477	0,006076	0,010141
49	0,004544	0,004907	0,005324	0,007792	0,014177
50	0,004916	0,005642	0,006615	0,01062	0,021437
51	0,005358	0,006575	0,008385	0,014855	0,033409
52	0,005845	0,007674	0,010639	0,020744	0,051722
53	0,006302	0,00877	0,013054	0,027575	0,074846
54	0,00665	0,009646	0,015092	0,033699	0,096956
55	0,006789	0,010006	0,015957	0,036388	0,107021
56	0,006679	0,009721	0,015273	0,034256	0,099022
57	0,006345	0,008878	0,013299	0,028296	0,077385
58	0,005865	0,007722	0,010742	0,021025	0,052639
59	0,005339	0,006535	0,008306	0,014658	0,032825
60	0,004837	0,005484	0,006329	0,009973	0,019717
61	0,004416	0,004666	0,004921	0,006961	0,012183
62	0,004089	0,004072	0,003981	0,005131	0,008063
63	0,003857	0,003675	0,003393	0,004074	0,005886
64	0,00372	0,00345	0,003077	0,003536	0,004848
65	0,00367	0,00337	0,002967	0,003355	0,00451
66	0,003711	0,003436	0,003056	0,003502	0,004784
67	0,00385	0,003665	0,003379	0,004048	0,005835
68	0,00411	0,004109	0,004038	0,005237	0,008289
69	0,004523	0,004868	0,005258	0,007655	0,013843
70	0,005136	0,0061	0,007466	0,012608	0,026912
71	0,006005	0,008051	0,011452	0,022989	0,059124
72	0,007183	0,011053	0,018553	0,044752	0,139536
73	0,008657	0,015335	0,030324	0,087246	0,326093
74	0,010336	0,020858	0,047802	0,160615	0,70286
75	0,011907	0,026604	0,068234	0,257657	1,268657
76	0,012887	0,030453	0,083027	0,333871	1,751434
77	0,01296	0,030748	0,084197	0,340084	1,792033
78	0,012046	0,02714	0,070245	0,26775	1,330868
79	0,010549	0,021606	0,05034	0,172079	0,766252
80	0,00889	0,016061	0,032488	0,095737	0,366681
81	0,007389	0,011618	0,020005	0,049609	0,159178
82	0,006195	0,008509	0,012466	0,025866	0,068896
83	0,005296	0,006442	0,008123	0,014206	0,0315
84	0,004662	0,005137	0,005716	0,008626	0,016246
85	0,004231	0,004325	0,004373	0,005874	0,009687
86	0,003952	0,003835	0,003626	0,004484	0,00671
87	0,003788	0,003562	0,003233	0,003798	0,005347
88	0,003716	0,003443	0,003067	0,003519	0,004817
89	0,003712	0,003438	0,003059	0,003507	0,004793
90	0,003765	0,003523	0,003178	0,003705	0,005169
91	0,003856	0,003674	0,003391	0,00407	0,005879
92	0,003962	0,003854	0,003653	0,004532	0,006809
93	0,004055	0,004013	0,003892	0,004966	0,007712
94	0,004102	0,004096	0,004018	0,005199	0,008208
95	0,004083	0,004062	0,003966	0,005103	0,008002
96	0,003992	0,003905	0,003729	0,004668	0,007089

97	0,003839	0,003645	0,003351	0,004001	0,005742
98	0,003654	0,003344	0,00293	0,003295	0,004401
99	0,003468	0,003055	0,002549	0,002693	0,003335
100	0,003311	0,00282	0,002254	0,002257	0,002615
101	0,003189	0,002645	0,002044	0,001962	0,002156
102	0,003123	0,002553	0,001938	0,001818	0,001942
103	0,00312	0,002549	0,001933	0,001811	0,001933
104	0,003168	0,002615	0,00201	0,001915	0,002086
105	0,003291	0,002791	0,002219	0,002207	0,002535
106	0,003503	0,003108	0,002618	0,0028	0,003517
107	0,003783	0,003553	0,00322	0,003777	0,005306
108	0,004101	0,004094	0,004014	0,005193	0,008195
109	0,004406	0,004646	0,004889	0,006896	0,01203
110	0,004581	0,004978	0,005445	0,008046	0,014801
111	0,004541	0,004903	0,005317	0,007776	0,014139
112	0,004285	0,004424	0,00453	0,00618	0,010375
113	0,003934	0,003804	0,003581	0,004404	0,006547
114	0,003584	0,003234	0,002783	0,003058	0,003972
115	0,003344	0,002868	0,002314	0,002343	0,002753
116	0,003257	0,002743	0,002161	0,002124	0,002405
117	0,003367	0,002903	0,002357	0,002407	0,002856
118	0,00379	0,003564	0,003235	0,003802	0,005355
119	0,004914	0,005639	0,006609	0,010607	0,021403
120	0,007763	0,01267	0,022792	0,059263	0,199674
121	0,015087	0,039782	0,122058	0,553849	3,280545
122	0,028526	0,114332	0,543617	3,840675	35,4504
123	0,030476	0,127325	0,631761	4,658753	44,88452
124	0,015132	0,039982	0,122941	0,5591	3,319072
125	0,007424	0,011715	0,020257	0,050466	0,162697
126	0,006546	0,00938	0,014464	0,031778	0,089896
127	0,224549	2,954106	46,6134	1094,506	33580,73

Таблица Б.3.4 Статистические данные интенсивности отказов и восстановлений трассы установления соединения, полученный математическим моделированием на интервале случайной последовательности

	Интенсивность отказов ТУС; $r$ – количество попыток (каналов)				
	$r=1$	$r=2$	$r=4$	$r=6$	$r=8$
Максимальное значение	0,05938	0,039646	0,029783	0,023868	0,019928
Минимальное значение	0,004464	0,004464	0,004464	0,004464	0,004464
Среднее значение	0,009948	0,007301	0,006103	0,005477	0,005124
СКО	0,007794	0,004998	0,003582	0,002726	0,002154

Продолжение Таблица Б.3.4 Статистические данные интенсивности отказов и восстановлений трассы установления соединения, полученный математическим моделированием на интервале случайной последовательности

	Интенсивность восстановления ТУС; $r$ – количество попыток (каналов)				
	$r=1$	$r=2$	$r=4$	$r=6$	$r=8$
Максимальное значение	87,983	24615	46,6134	1094,506	33580,73
Минимальное значение	0,002414	0,001677	0,00105	0,000784	0,000639
Среднее значение	1,395996	387,6959	0,696303	14,63435	422,4152
СКО	10,99589	3076,675	5,00958	114,2021	3416,219

#### Б.4 Численные результаты математического моделирования надежности узла следующего перехода

Определение вероятности потери кадра данных  $Q_{п.к.}$  основано на методе расчета надежности приема дискретных сообщений с заданной достоверностью в условиях случайных помех [8] при следующих исходных данных:

- распределение вероятностей уровней помех подчиняется нормальному закону распределения;
- $p_{ош.доп} = 10^{-3}$  – допустимое значение уровня ошибок элемента сигнала;
- $\sigma_z = 10$  – среднеквадратическое отклонение величины ошибки элемента сигнала;
- $p_{ош.} = (10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1})$  – вероятность ошибки элемента сигнала.

В результате моделирования, получены показатели коэффициента готовности узла следующего перехода при различных значениях интенсивности поступления запросов передачи данных и вероятности потери кадров данных  $Q_{п.к.}$ . Численные результаты математического моделирования приведены в таблице Б.4.1.

Таблица Б.4.1 – Интенсивность обработки запроса передачи данных при заданной вероятности потери кадра

Вероятность потери кадра $Q_{п.к.}$	Интенсивность обработки запроса ПД
$10^{-5}$	0,1852
$10^{-4}$	0,1405
$10^{-3}$	0,0737
$10^{-2}$	0,0527
$10^{-1}$	0,0508

Таблица Б.4.2 – Коэффициента готовности узла следующего перехода

Интенсивность запросов передачи данных	Коэффициент готовности узла следующего перехода при заданной вероятности потери кадра $Q_{п.к.}$				
	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
0,0200	0,9025	0,8754	0,7866	0,7247	0,7175
<b>0,0397</b>	0,7001	<b>0,6391</b>	0,4816	0,3989	0,3904
0,0693	0,5718	0,5032	0,3471	0,2752	0,2681
<b>0,0990</b>	0,4832	<b>0,4150</b>	0,2713	0,2101	0,2042
0,1287	0,4184	0,3531	0,2226	0,1699	0,1649
0,1583	0,3690	0,3073	0,1888	0,1426	0,1383
0,1880	0,3300	0,2720	0,1639	0,1228	0,1190
0,2177	0,2984	0,2440	0,1448	0,1079	0,1045
0,2473	0,2724	0,2212	0,1297	0,0962	0,0931
0,2770	0,2505	0,2023	0,1174	0,0868	0,0840
0,3067	0,2319	0,1864	0,1073	0,0791	0,0765
0,3363	0,2158	0,1728	0,0988	0,0726	0,0702
0,3660	0,2019	0,1610	0,0915	0,0671	0,0649
0,3957	0,1896	0,1508	0,0852	0,0624	0,0603
0,4253	0,1788	0,1417	0,0797	0,0583	0,0564
0,4550	0,1691	0,1337	0,0749	0,0547	0,0529
0,4847	0,1604	0,1266	0,0707	0,0515	0,0498

0,5143	0,1525	0,1202	0,0669	0,0487	0,0471
0,5440	0,1454	0,1143	0,0634	0,0462	0,0446
0,5737	0,1390	0,1091	0,0604	0,0439	0,0424
0,6033	0,1330	0,1043	0,0576	0,0418	0,0404
0,6330	0,1276	0,0999	0,0550	0,0399	0,0386
0,6627	0,1226	0,0958	0,0527	0,0382	0,0369
0,6923	0,1179	0,0921	0,0505	0,0366	0,0354
0,7220	0,1137	0,0887	0,0486	0,0352	0,0340
0,7517	0,1097	0,0855	0,0467	0,0338	0,0327
0,7813	0,1059	0,0825	0,0450	0,0326	0,0315
0,8110	0,1025	0,0797	0,0435	0,0314	0,0304
0,8407	0,0992	0,0771	0,0420	0,0304	0,0293
0,8703	0,0961	0,0747	0,0406	0,0294	0,0284

### Б.5 Численные результаты математического моделирования надежности физического канала

Для моделирования зависимости коэффициента готовности канала передачи данных  $e_{пд.i} \in E_{пд}$  использовались следующие исходные данные таблица Б.5.1.

Таблица Б.5.1 – исходные данные моделирования зависимости коэффициента готовности канала передачи данных  $e_{пд.i} \in E_{пд}$

№	Вероятность приема дискретного сообщения	Интенсивность отказов среды передачи данных	Интенсивность восстановления среды передачи данных
1	0,01	1,484257871	0,014993
2	0,02	1,469265367	0,029985
3	0,03	1,454272864	0,044978
4	0,04	1,43928036	0,05997
5	0,05	1,424287856	0,074963
6	0,06	1,409295352	0,089955
7	0,07	1,394302849	0,104948
8	0,08	1,379310345	0,11994
9	0,09	1,364317841	0,134933
10	0,1	1,349325337	0,149925
11	0,11	1,334332834	0,164918
12	0,12	1,31934033	0,17991
13	0,13	1,304347826	0,194903
14	0,14	1,289355322	0,209895
15	0,15	1,274362819	0,224888
16	0,16	1,259370315	0,23988
17	0,17	1,244377811	0,254873
18	0,18	1,229385307	0,269865
19	0,19	1,214392804	0,284858
20	0,2	1,1994003	0,29985
21	0,21	1,184407796	0,314843
22	0,22	1,169415292	0,329835
23	0,23	1,154422789	0,344828
24	0,24	1,139430285	0,35982
25	0,25	1,124437781	0,374813
26	0,26	1,109445277	0,389805
27	0,27	1,094452774	0,404798
28	0,28	1,07946027	0,41979
29	0,29	1,064467766	0,434783
30	0,3	1,049475262	0,449775
31	0,31	1,034482759	0,464768

32	0,32	1,019490255	0,47976
33	0,33	1,004497751	0,494753
34	0,34	0,989505247	0,509745
35	0,35	0,974512744	0,524738
36	0,36	0,95952024	0,53973
37	0,37	0,944527736	0,554723
38	0,38	0,929535232	0,569715
39	0,39	0,914542729	0,584708
40	0,4	0,899550225	0,5997
41	0,41	0,884557721	0,614693
42	0,42	0,869565217	0,629685
43	0,43	0,854572714	0,644678
44	0,44	0,83958021	0,65967
45	0,45	0,824587706	0,674663
46	0,46	0,809595202	0,689655
47	0,47	0,794602699	0,704648
48	0,48	0,779610195	0,71964
49	0,49	0,764617691	0,734633
50	0,5	0,749625187	0,749625
51	0,51	0,734632684	0,764618
52	0,52	0,71964018	0,77961
53	0,53	0,704647676	0,794603
54	0,54	0,689655172	0,809595
55	0,55	0,674662669	0,824588
56	0,56	0,659670165	0,83958
57	0,57	0,644677661	0,854573
58	0,58	0,629685157	0,869565
59	0,59	0,614692654	0,884558
60	0,6	0,59970015	0,89955
61	0,61	0,584707646	0,914543
62	0,62	0,569715142	0,929535
63	0,63	0,554722639	0,944528
64	0,64	0,539730135	0,95952
65	0,65	0,524737631	0,974513
66	0,66	0,509745127	0,989505
67	0,67	0,494752624	1,004498
68	0,68	0,47976012	1,01949
69	0,69	0,464767616	1,034483
70	0,7	0,449775112	1,049475
71	0,71	0,434782609	1,064468
72	0,72	0,419790105	1,07946
73	0,73	0,404797601	1,094453
74	0,74	0,389805097	1,109445
75	0,75	0,374812594	1,124438
76	0,76	0,35982009	1,13943
77	0,77	0,344827586	1,154423
78	0,78	0,329835082	1,169415
79	0,79	0,314842579	1,184408
80	0,8	0,299850075	1,1994
81	0,81	0,284857571	1,214393
82	0,82	0,269865067	1,229385
83	0,83	0,254872564	1,244378
84	0,84	0,23988006	1,25937
85	0,85	0,224887556	1,274363
86	0,86	0,209895052	1,289355
87	0,87	0,194902549	1,304348
88	0,88	0,179910045	1,31934
89	0,89	0,164917541	1,334333
90	0,9	0,149925037	1,349325
91	0,91	0,134932534	1,364318

92	0,92	0,11994003	1,37931
93	0,93	0,104947526	1,394303
94	0,94	0,089955022	1,409295
95	0,95	0,074962519	1,424288
96	0,96	0,059970015	1,43928
97	0,97	0,044977511	1,454273
98	0,98	0,029985007	1,469265
99	0,99	0,014992504	1,484258

В таблице Б.5.2 приведены численные результаты математического моделирования коэффициента готовности  $F_{e_{пд,i}}$  канала передачи данных  $e_{пд,i} \in E_{пд}$ .

Таблица Б.5.2 – Зависимость коэффициента готовности физического канала передачи данных от интенсивности отказов (потери кадров) при  $r$  допустимом количестве попыток передачи кадра, где  $r = 1, 2, 3, 4$

№	$r=1$			$r=2$		
	Коэффициент готовности физического канала	Интенсивность отказов физического канала	Интенсивность восстановления физического канала	Коэффициент готовности физического канала	Интенсивность отказов физического канала	Интенсивность восстановления физического канала
1	0,01	1,484257871	0,014993	0,0199	0,7384	0,044978
2	0,02	1,469265367	0,029985	0,0396	0,727212	0,089955
3	0,03	1,454272864	0,044978	0,0591	0,716063	0,134933
4	0,04	1,43928036	0,05997	0,0784	0,704954	0,17991
5	0,05	1,424287856	0,074963	0,0975	0,693884	0,224888
6	0,06	1,409295352	0,089955	0,1164	0,682854	0,269865
7	0,07	1,394302849	0,104948	0,1351	0,671866	0,314843
8	0,08	1,379310345	0,11994	0,1536	0,66092	0,35982
9	0,09	1,364317841	0,134933	0,1719	0,650015	0,404798
10	0,1	1,349325337	0,149925	0,19	0,639154	0,449775
11	0,11	1,334332834	0,164918	0,2079	0,628337	0,494753
12	0,12	1,31934033	0,17991	0,2256	0,617564	0,53973
13	0,13	1,304347826	0,194903	0,2431	0,606836	0,584708
14	0,14	1,289355322	0,209895	0,2604	0,596154	0,629685
15	0,15	1,274362819	0,224888	0,2775	0,585518	0,674663
16	0,16	1,259370315	0,23988	0,2944	0,57493	0,71964
17	0,17	1,244377811	0,254873	0,3111	0,56439	0,764618
18	0,18	1,229385307	0,269865	0,3276	0,553899	0,809595
19	0,19	1,214392804	0,284858	0,3439	0,543458	0,854573
20	0,2	1,1994003	0,29985	0,36	0,533067	0,89955
21	0,21	1,184407796	0,314843	0,3759	0,522727	0,944528
22	0,22	1,169415292	0,329835	0,3916	0,51244	0,989505
23	0,23	1,154422789	0,344828	0,4071	0,502207	1,034483
24	0,24	1,139430285	0,35982	0,4224	0,492027	1,07946
25	0,25	1,124437781	0,374813	0,4375	0,481902	1,124438
26	0,26	1,109445277	0,389805	0,4524	0,471833	1,169415
27	0,27	1,094452774	0,404798	0,4671	0,461821	1,214393
28	0,28	1,07946027	0,41979	0,4816	0,451867	1,25937
29	0,29	1,064467766	0,434783	0,4959	0,441972	1,304348
30	0,3	1,049475262	0,449775	0,51	0,432137	1,349325
31	0,31	1,034482759	0,464768	0,5239	0,422363	1,394303
32	0,32	1,019490255	0,47976	0,5376	0,412651	1,43928
33	0,33	1,004497751	0,494753	0,5511	0,403002	1,484258
34	0,34	0,989505247	0,509745	0,5644	0,393418	1,529235
35	0,35	0,974512744	0,524738	0,5775	0,383899	1,574213
36	0,36	0,95952024	0,53973	0,5904	0,374447	1,61919
37	0,37	0,944527736	0,554723	0,6031	0,365063	1,664168

38	0,38	0,929535232	0,569715	0,6156	0,355748	1,709145
39	0,39	0,914542729	0,584708	0,6279	0,346504	1,754123
40	0,4	0,899550225	0,5997	0,64	0,337331	1,7991
41	0,41	0,884557721	0,614693	0,6519	0,328232	1,844078
42	0,42	0,869565217	0,629685	0,6636	0,319207	1,889055
43	0,43	0,854572714	0,644678	0,6751	0,310259	1,934033
44	0,44	0,83958021	0,65967	0,6864	0,301388	1,97901
45	0,45	0,824587706	0,674663	0,6975	0,292596	2,023988
46	0,46	0,809595202	0,689655	0,7084	0,283884	2,068966
47	0,47	0,794602699	0,704648	0,7191	0,275255	2,113943
48	0,48	0,779610195	0,71964	0,7296	0,266709	2,158921
49	0,49	0,764617691	0,734633	0,7399	0,258248	2,203898
50	0,5	0,749625187	0,749625	0,75	0,249875	2,248876
51	0,51	0,734632684	0,764618	0,7599	0,241591	2,293853
52	0,52	0,71964018	0,77961	0,7696	0,233397	2,338831
53	0,53	0,704647676	0,794603	0,7791	0,225296	2,383808
54	0,54	0,689655172	0,809595	0,7884	0,217289	2,428786
55	0,55	0,674662669	0,824588	0,7975	0,209378	2,473763
56	0,56	0,659670165	0,83958	0,8064	0,201566	2,518741
57	0,57	0,644677661	0,854573	0,8151	0,193854	2,563718
58	0,58	0,629685157	0,869565	0,8236	0,186245	2,608696
59	0,59	0,614692654	0,884558	0,8319	0,17874	2,653673
60	0,6	0,59970015	0,89955	0,84	0,171343	2,698651
61	0,61	0,584707646	0,914543	0,8479	0,164055	2,743628
62	0,62	0,569715142	0,929535	0,8556	0,156878	2,788606
63	0,63	0,554722639	0,944528	0,8631	0,149816	2,833583
64	0,64	0,539730135	0,95952	0,8704	0,14287	2,878561
65	0,65	0,524737631	0,974513	0,8775	0,136043	2,923538
66	0,66	0,509745127	0,989505	0,8844	0,129338	2,968516
67	0,67	0,494752624	1,004498	0,8911	0,122758	3,013493
68	0,68	0,47976012	1,01949	0,8976	0,116305	3,058471
69	0,69	0,464767616	1,034483	0,9039	0,109983	3,103448
70	0,7	0,449775112	1,049475	0,91	0,103794	3,148426
71	0,71	0,434782609	1,064468	0,9159	0,097742	3,193403
72	0,72	0,419790105	1,07946	0,9216	0,091829	3,238381
73	0,73	0,404797601	1,094453	0,9271	0,086059	3,283358
74	0,74	0,389805097	1,109445	0,9324	0,080436	3,328336
75	0,75	0,374812594	1,124438	0,9375	0,074963	3,373313
76	0,76	0,35982009	1,13943	0,9424	0,069643	3,418291
77	0,77	0,344827586	1,154423	0,9471	0,06448	3,463268
78	0,78	0,329835082	1,169415	0,9516	0,059478	3,508246
79	0,79	0,314842579	1,184408	0,9559	0,054642	3,553223
80	0,8	0,299850075	1,1994	0,96	0,049975	3,598201
81	0,81	0,284857571	1,214393	0,9639	0,045481	3,643178
82	0,82	0,269865067	1,229385	0,9676	0,041166	3,688156
83	0,83	0,254872564	1,244378	0,9711	0,037033	3,733133
84	0,84	0,23988006	1,25937	0,9744	0,033087	3,778111
85	0,85	0,224887556	1,274363	0,9775	0,029333	3,823088
86	0,86	0,209895052	1,289355	0,9804	0,025777	3,868066
87	0,87	0,194902549	1,304348	0,9831	0,022422	3,913043
88	0,88	0,179910045	1,31934	0,9856	0,019276	3,958021
89	0,89	0,164917541	1,334333	0,9879	0,016343	4,002999
90	0,9	0,149925037	1,349325	0,99	0,01363	4,047976
91	0,91	0,134932534	1,364318	0,9919	0,011141	4,092954
92	0,92	0,11994003	1,37931	0,9936	0,008884	4,137931
93	0,93	0,104947526	1,394303	0,9951	0,006866	4,182909
94	0,94	0,089955022	1,409295	0,9964	0,005092	4,227886
95	0,95	0,074962519	1,424288	0,9975	0,00357	4,272864
96	0,96	0,059970015	1,43928	0,9984	0,002307	4,317841
97	0,97	0,044977511	1,454273	0,9991	0,00131	4,362819

98	0,98	0,029985007	1,469265	0,9996	0,000588	4,407796
99	0,99	0,014992504	1,484258	0,9999	0,000148	4,452774

Продолжение таблицы Б.5.2 – Зависимость коэффициента готовности физического канала передачи данных от интенсивности отказов (потери кадров) при  $r$  допустимом количестве попыток передачи кадра, где  $r = 1, 2, 3, 4$

№	r= 3			r= 4		
	Коэффициент готовности физического канала	Интенсивность отказов физического канала	Интенсивность восстановления физического канала	Коэффициент готовности физического канала	Интенсивность отказов физического канала	Интенсивность восстановления физического канала
1	0,029701	0,489789	0,05997	0,039404	0,365489	0,074963
2	0,058808	0,479895	0,11994	0,077632	0,356261	0,149925
3	0,087327	0,47007	0,17991	0,114707	0,34713	0,224888
4	0,115264	0,460314	0,23988	0,150653	0,338096	0,29985
5	0,142625	0,450629	0,29985	0,185494	0,329162	0,374813
6	0,169416	0,441016	0,35982	0,219251	0,320328	0,449775
7	0,195643	0,431476	0,41979	0,251948	0,311597	0,524738
8	0,221312	0,42201	0,47976	0,283607	0,302969	0,5997
9	0,246429	0,412619	0,53973	0,31425	0,294447	0,674663
10	0,271	0,403304	0,5997	0,3439	0,28603	0,749625
11	0,295031	0,394066	0,65967	0,372578	0,277722	0,824588
12	0,318528	0,384907	0,71964	0,400305	0,269523	0,89955
13	0,341497	0,375827	0,77961	0,427102	0,261434	0,974513
14	0,363944	0,366828	0,83958	0,452992	0,253458	1,049475
15	0,385875	0,357911	0,89955	0,477994	0,245595	1,124438
16	0,407296	0,349078	0,95952	0,502129	0,237846	1,1994
17	0,428213	0,340328	1,01949	0,525417	0,230214	1,274363
18	0,448632	0,331664	1,07946	0,547878	0,222699	1,349325
19	0,468559	0,323086	1,13943	0,569533	0,215303	1,424288
20	0,488	0,314597	1,1994	0,5904	0,208026	1,49925
21	0,506961	0,306196	1,25937	0,610499	0,200871	1,574213
22	0,525448	0,297887	1,31934	0,629849	0,193838	1,649175
23	0,543467	0,289668	1,37931	0,64847	0,186928	1,724138
24	0,561024	0,281543	1,43928	0,666378	0,180144	1,7991
25	0,578125	0,273512	1,49925	0,683594	0,173485	1,874063
26	0,594776	0,265576	1,55922	0,700134	0,166953	1,949025
27	0,610983	0,257737	1,61919	0,716018	0,160548	2,023988
28	0,626752	0,249997	1,67916	0,731261	0,154273	2,098951
29	0,642089	0,242355	1,73913	0,745883	0,148127	2,173913
30	0,657	0,234814	1,7991	0,7599	0,142112	2,248876
31	0,671491	0,227375	1,85907	0,773329	0,136229	2,323838
32	0,685568	0,220039	1,91904	0,786186	0,130477	2,398801
33	0,699237	0,212808	1,97901	0,798489	0,124859	2,473763
34	0,712504	0,205683	2,038981	0,810253	0,119374	2,548726
35	0,725375	0,198664	2,098951	0,821494	0,114023	2,623688
36	0,737856	0,191754	2,158921	0,832228	0,108806	2,698651
37	0,749953	0,184954	2,218891	0,84247	0,103725	2,773613
38	0,761672	0,178264	2,278861	0,852237	0,098779	2,848576
39	0,773019	0,171687	2,338831	0,861542	0,093968	2,923538
40	0,784	0,165224	2,398801	0,8704	0,089294	2,998501
41	0,794621	0,158874	2,458771	0,878826	0,084755	3,073463
42	0,804888	0,152641	2,518741	0,886835	0,080351	3,148426
43	0,814807	0,146525	2,578711	0,89444	0,076084	3,223388
44	0,824384	0,140528	2,638681	0,901655	0,071951	3,298351
45	0,833625	0,134649	2,698651	0,908494	0,067954	3,373313
46	0,842536	0,128892	2,758621	0,914969	0,064092	3,448276
47	0,851123	0,123256	2,818591	0,921095	0,060363	3,523238
48	0,859392	0,117743	2,878561	0,926884	0,056768	3,598201

49	0,867349	0,112354	2,938531	0,932348	0,053306	3,673163
50	0,875	0,107089	2,998501	0,9375	0,049975	3,748126
51	0,882351	0,101951	3,058471	0,942352	0,046775	3,823088
52	0,889408	0,096939	3,118441	0,946916	0,043705	3,898051
53	0,896177	0,092056	3,178411	0,951203	0,040763	3,973013
54	0,902664	0,0873	3,238381	0,955225	0,037948	4,047976
55	0,908875	0,082674	3,298351	0,958994	0,035259	4,122939
56	0,914816	0,078178	3,358321	0,962519	0,032694	4,197901
57	0,920493	0,073813	3,418291	0,965812	0,03025	4,272864
58	0,925912	0,069579	3,478261	0,968883	0,027927	4,347826
59	0,931079	0,065477	3,538231	0,971742	0,025722	4,422789
60	0,936	0,061508	3,598201	0,9744	0,023634	4,497751
61	0,940681	0,057671	3,658171	0,976866	0,021658	4,572714
62	0,945128	0,053967	3,718141	0,979149	0,019795	4,647676
63	0,949347	0,050396	3,778111	0,981258	0,01804	4,722639
64	0,953344	0,046958	3,838081	0,983204	0,016392	4,797601
65	0,957125	0,043654	3,898051	0,984994	0,014847	4,872564
66	0,960696	0,040483	3,958021	0,986637	0,013402	4,947526
67	0,964063	0,037444	4,017991	0,988141	0,012056	5,022489
68	0,967232	0,034538	4,077961	0,989514	0,010803	5,097451
69	0,970209	0,031765	4,137931	0,990765	0,009643	5,172414
70	0,973	0,029122	4,197901	0,9919	0,00857	5,247376
71	0,975611	0,02661	4,257871	0,992927	0,007582	5,322339
72	0,978048	0,024228	4,317841	0,993853	0,006676	5,397301
73	0,980317	0,021975	4,377811	0,994686	0,005847	5,472264
74	0,982424	0,019848	4,437781	0,99543	0,005093	5,547226
75	0,984375	0,017848	4,497751	0,996094	0,00441	5,622189
76	0,986176	0,015972	4,557721	0,996682	0,003793	5,697151
77	0,987833	0,014219	4,617691	0,997202	0,00324	5,772114
78	0,989352	0,012586	4,677661	0,997657	0,002746	5,847076
79	0,990739	0,011071	4,737631	0,998055	0,002308	5,922039
80	0,992	0,009673	4,797601	0,9984	0,001922	5,997002
81	0,993141	0,008387	4,857571	0,998697	0,001585	6,071964
82	0,994168	0,007212	4,917541	0,99895	0,001292	6,146927
83	0,995087	0,006144	4,977511	0,999165	0,00104	6,221889
84	0,995904	0,00518	5,037481	0,999345	0,000826	6,296852
85	0,996625	0,004316	5,097451	0,999494	0,000645	6,371814
86	0,997256	0,003548	5,157421	0,999616	0,000496	6,446777
87	0,997803	0,002872	5,217391	0,999714	0,000373	6,521739
88	0,998272	0,002284	5,277361	0,999793	0,000274	6,596702
89	0,998669	0,001778	5,337331	0,999854	0,000195	6,671664
90	0,999	0,001351	5,397301	0,9999	0,000135	6,746627
91	0,999271	0,000995	5,457271	0,999934	8,95E-05	6,821589
92	0,999488	0,000707	5,517241	0,999959	5,65E-05	6,896552
93	0,999657	0,000478	5,577211	0,999976	3,35E-05	6,971514
94	0,999784	0,000304	5,637181	0,999987	1,83E-05	7,046477
95	0,999875	0,000178	5,697151	0,999994	8,90E-06	7,121439
96	0,999936	9,21E-05	5,757121	0,999997	3,68E-06	7,196402
97	0,999973	3,93E-05	5,817091	0,999999	1,18E-06	7,271364
98	0,999992	1,18E-05	5,877061	1	2,35E-07	7,346327
99	0,999999	1,48E-06	5,937031	1	1,48E-08	7,421289

Значения вероятности исправного состояния  $\{P_{иск.i}\}$  каналов передачи данных  $\{e_{пд.i}\} \in E_{пд}$ .

Таблица Б.5.3 Вероятность исправного состояния физического канала

№	Время обновления отношений соседства	Вероятность ошибки элемента сигнала	Вероятность успешного приема кадра	Вероятность исправного состояния канала.
1	107,014	0,00025	0,7296	0,8190

2	360,614	0,00036	0,6724	0,7498
3	394,214	0,00035	0,6782	0,7330
4	457,414	0,00026	0,7198	0,7483
5	714,214	0,00029	0,7038	0,7345
6	715,814	0,00025	0,7244	0,7645
7	971,814	0,00024	0,7302	0,7955
8	1130,214	0,00028	0,7122	0,7910
9	1131,014	0,00025	0,7278	0,8051
10	1387,014	0,00030	0,7017	0,7917
11	1576,614	0,00026	0,7226	0,7875
12	2024,614	1,00000	0,0000	0,3318
13	2281,414	0,00036	0,6724	0,3248
14	2345,414	0,00028	0,7095	0,3257
15	2539,814	0,00028	0,7090	0,3241
16	2603,014	0,00026	0,7193	0,7553
17	2889,414	0,00025	0,7255	0,7871
18	2985,414	0,00030	0,7007	0,7818
19	3179,814	0,00022	0,7435	0,8012
20	3562,214	0,00027	0,7149	0,7986
21	3627,014	0,37638	0,0007	0,3329
22	3690,214	0,00239	0,3521	0,2734
23	4073,414	0,00235	0,3549	0,2297
24	4104,614	0,00323	0,3046	0,1940
25	4171,814	0,00336	0,2986	0,2412
26	4619,814	1,00000	0,0000	0,1887
27	4872,614	0,00300	0,3160	0,1851
28	5032,614	0,00285	0,3240	0,1869
29	5099,814	0,00278	0,3279	0,1897
30	5547,814	1,00000	0,0000	0,1897
31	5801,414	0,00295	0,3186	0,1900
32	5930,214	0,00243	0,3494	0,1925
33	5963,814	0,00288	0,3224	0,1919
34	6153,414	0,00264	0,3361	0,2440
35	6571,014	0,00307	0,3124	0,2430
36	6696,614	0,00308	0,3119	0,2373
37	6795,014	0,00249	0,3455	0,2408
38	7209,414	0,00313	0,3095	0,2367
39	7211,014	0,00264	0,3361	0,2403
40	7243,014	0,00266	0,3349	0,2439
41	7371,014	0,00233	0,3562	0,2456
42	7465,414	0,00359	0,2886	0,2421
43	7499,014	0,00345	0,2946	0,2357
44	7531,014	0,00018	0,7727	0,2884
45	7753,414	0,00014	0,8053	0,3671
46	7818,214	0,00016	0,7872	0,5464
47	7851,814	0,00013	0,8106	0,9465
48	8170,214	0,00018	0,7691	0,9450
49	8203,814	0,00011	0,8364	0,9550
50	8267,014	0,00012	0,8254	0,9671
51	8392,614	0,00014	0,8080	0,9663
52	8426,214	0,00012	0,8197	0,9807
53	8555,014	0,00012	0,8188	0,9769
54	8587,814	0,00013	0,8115	0,9735
55	8746,214	0,00012	0,8235	0,9774
56	8842,214	0,00016	0,7880	0,9686
57	8905,414	0,00014	0,8036	0,9642
58	9033,414	0,00017	0,7764	0,9520
59	9481,414	1,00000	0,0000	0,3567
60	9482,214	0,00012	0,8264	0,3604

61	9611,814	0,00014	0,8036	0,9546
62	9675,814	0,00015	0,7960	0,9525
63	9739,814	0,00013	0,8142	0,9535
64	9770,214	0,00017	0,7833	0,9301

### Б.6 Численные результаты математического моделирования надежности интерфейса узла

Для математического моделирования надежности интерфейса передачи данных узла приняты следующие диапазоны значений параметров таблица Б.6.1. Коэффициент готовности интерфейса, состоящего из  $n = 4$  интерфейсных каналов, определяется следующим выражением:

$$F_{И}(n) = \frac{\prod_{i=0}^3 \lambda_{e.и.i}}{\prod_{i=0}^3 \lambda_{e.и.i} + [\prod_{i=0}^2 \lambda_{e.и.i} + [\prod_{i=0}^1 \lambda_{e.и.i} + [\prod_{i=0}^0 \lambda_{e.и.i} + \sum_{i=0}^0 \mu_{e.и.i}] * \sum_{i=0}^1 \mu_{e.и.i}] * \sum_{i=0}^2 \mu_{e.и.i}] * \sum_{i=0}^3 \mu_{e.и.i}}, \quad (\text{Б.6.1})$$

где  $n = 4$ . В результате математического моделирования получены зависимости коэффициента готовности  $F_{И}$  интерфейса от интенсивности отказов  $\lambda_{e.и}$  каналов передачи данных при различном количестве интерфейсных каналов в составе интерфейса  $n = 1, 2, 3, 4$ . Численные результаты математического моделирования: значения коэффициента готовности, интенсивности отказов и восстановлений интерфейса приведены в таблице Б.6.1.

Таблица Б.6.1 Зависимость коэффициента готовности интерфейса узла от интенсивности отказов при количестве интерфейсных каналов  $n$ , где  $n = 1, 2, 3, 4$

№	r = 1		n = 1		
	Интенсивность отказов физического канала	Интенсивность восстановления физического канала	Коэффициент готовности интерфейса	Интенсивность отказов интерфейса	Интенсивность восстановления интерфейса
1	1,484258	0,014993	0,01	1,469415	0,014993
2	1,469265	0,029985	0,02	1,43988	0,029985
3	1,454273	0,044978	0,03	1,410645	0,044978
4	1,43928	0,05997	0,04	1,381709	0,05997
5	1,424288	0,074963	0,05	1,353073	0,074963
6	1,409295	0,089955	0,06	1,324738	0,089955
7	1,394303	0,104948	0,07	1,296702	0,104948
8	1,37931	0,11994	0,08	1,268966	0,11994
9	1,364318	0,134933	0,09	1,241529	0,134933
10	1,349325	0,149925	0,1	1,214393	0,149925
11	1,334333	0,164918	0,11	1,187556	0,164918
12	1,31934	0,17991	0,12	1,161019	0,17991
13	1,304348	0,194903	0,13	1,134783	0,194903
14	1,289355	0,209895	0,14	1,108846	0,209895
15	1,274363	0,224888	0,15	1,083208	0,224888
16	1,25937	0,23988	0,16	1,057871	0,23988
17	1,244378	0,254873	0,17	1,032834	0,254873
18	1,229385	0,269865	0,18	1,008096	0,269865
19	1,214393	0,284858	0,19	0,983658	0,284858
20	1,1994	0,29985	0,2	0,95952	0,29985
21	1,184408	0,314843	0,21	0,935682	0,314843
22	1,169415	0,329835	0,22	0,912144	0,329835
23	1,154423	0,344828	0,23	0,888906	0,344828
24	1,13943	0,35982	0,24	0,865967	0,35982
25	1,124438	0,374813	0,25	0,843328	0,374813

26	1,109445	0,389805	0,26	0,82099	0,389805
27	1,094453	0,404798	0,27	0,798951	0,404798
28	1,07946	0,41979	0,28	0,777211	0,41979
29	1,064468	0,434783	0,29	0,755772	0,434783
30	1,049475	0,449775	0,3	0,734633	0,449775
31	1,034483	0,464768	0,31	0,713793	0,464768
32	1,01949	0,47976	0,32	0,693253	0,47976
33	1,004498	0,494753	0,33	0,673013	0,494753
34	0,989505	0,509745	0,34	0,653073	0,509745
35	0,974513	0,524738	0,35	0,633433	0,524738
36	0,95952	0,53973	0,36	0,614093	0,53973
37	0,944528	0,554723	0,37	0,595052	0,554723
38	0,929535	0,569715	0,38	0,576312	0,569715
39	0,914543	0,584708	0,39	0,557871	0,584708
40	0,89955	0,5997	0,4	0,53973	0,5997
41	0,884558	0,614693	0,41	0,521889	0,614693
42	0,869565	0,629685	0,42	0,504348	0,629685
43	0,854573	0,644678	0,43	0,487106	0,644678
44	0,83958	0,65967	0,44	0,470165	0,65967
45	0,824588	0,674663	0,45	0,453523	0,674663
46	0,809595	0,689655	0,46	0,437181	0,689655
47	0,794603	0,704648	0,47	0,421139	0,704648
48	0,77961	0,71964	0,48	0,405397	0,71964
49	0,764618	0,734633	0,49	0,389955	0,734633
50	0,749625	0,749625	0,5	0,374813	0,749625
51	0,734633	0,764618	0,51	0,35997	0,764618
52	0,71964	0,77961	0,52	0,345427	0,77961
53	0,704648	0,794603	0,53	0,331184	0,794603
54	0,689655	0,809595	0,54	0,317241	0,809595
55	0,674663	0,824588	0,55	0,303598	0,824588
56	0,65967	0,83958	0,56	0,290255	0,83958
57	0,644678	0,854573	0,57	0,277211	0,854573
58	0,629685	0,869565	0,58	0,264468	0,869565
59	0,614693	0,884558	0,59	0,252024	0,884558
60	0,5997	0,89955	0,6	0,23988	0,89955
61	0,584708	0,914543	0,61	0,228036	0,914543
62	0,569715	0,929535	0,62	0,216492	0,929535
63	0,554723	0,944528	0,63	0,205247	0,944528
64	0,53973	0,95952	0,64	0,194303	0,95952
65	0,524738	0,974513	0,65	0,183658	0,974513
66	0,509745	0,989505	0,66	0,173313	0,989505
67	0,494753	1,004498	0,67	0,163268	1,004498
68	0,47976	1,01949	0,68	0,153523	1,01949
69	0,464768	1,034483	0,69	0,144078	1,034483
70	0,449775	1,049475	0,7	0,134933	1,049475
71	0,434783	1,064468	0,71	0,126087	1,064468
72	0,41979	1,07946	0,72	0,117541	1,07946
73	0,404798	1,094453	0,73	0,109295	1,094453
74	0,389805	1,109445	0,74	0,101349	1,109445
75	0,374813	1,124438	0,75	0,093703	1,124438
76	0,35982	1,13943	0,76	0,086357	1,13943
77	0,344828	1,154423	0,77	0,07931	1,154423
78	0,329835	1,169415	0,78	0,072564	1,169415
79	0,314843	1,184408	0,79	0,066117	1,184408
80	0,29985	1,1994	0,8	0,05997	1,1994
81	0,284858	1,214393	0,81	0,054123	1,214393
82	0,269865	1,229385	0,82	0,048576	1,229385
83	0,254873	1,244378	0,83	0,043328	1,244378
84	0,23988	1,25937	0,84	0,038381	1,25937
85	0,224888	1,274363	0,85	0,033733	1,274363

86	0,209895	1,289355	0,86	0,029385	1,289355
87	0,194903	1,304348	0,87	0,025337	1,304348
88	0,17991	1,31934	0,88	0,021589	1,31934
89	0,164918	1,334333	0,89	0,018141	1,334333
90	0,149925	1,349325	0,9	0,014993	1,349325
91	0,134933	1,364318	0,91	0,012144	1,364318
92	0,11994	1,37931	0,92	0,009595	1,37931
93	0,104948	1,394303	0,93	0,007346	1,394303
94	0,089955	1,409295	0,94	0,005397	1,409295
95	0,074963	1,424288	0,95	0,003748	1,424288
96	0,05997	1,43928	0,96	0,002399	1,43928
97	0,044978	1,454273	0,97	0,001349	1,454273
98	0,029985	1,469265	0,98	0,0006	1,469265
99	0,014993	1,484258	0,99	0,00015	1,484258

Продолжение таблицы Б.6.1 Зависимость коэффициента готовности интерфейса узла от интенсивности отказов при количестве интерфейсных каналов  $n$ , где  $n = 1, 2, 3, 4$

№	n = 2			n = 3		
	Коэффициент готовности интерфейса	Интенсивность отказов интерфейса	Интенсивность восстановления интерфейса	Коэффициент готовности интерфейса	Интенсивность отказов интерфейса	Интенсивность восстановления интерфейса
1	0,0101	1,454576	0,029985	0,010101	1,439739	0,044978
2	0,0204	1,410518	0,05997	0,020408	1,381181	0,089955
3	0,030899	1,367095	0,089955	0,030927	1,32363	0,134933
4	0,041597	1,324322	0,11994	0,041664	1,267139	0,17991
5	0,052493	1,282214	0,149925	0,052624	1,211758	0,224888
6	0,063586	1,240787	0,17991	0,063814	1,157537	0,269865
7	0,074874	1,200052	0,209895	0,075239	1,104523	0,314843
8	0,086356	1,160024	0,23988	0,086904	1,052761	0,35982
9	0,098029	1,120714	0,269865	0,098815	1,002293	0,404798
10	0,10989	1,082132	0,29985	0,110976	0,953157	0,449775
11	0,121938	1,044289	0,329835	0,123391	0,905388	0,494753
12	0,134168	1,007194	0,35982	0,136065	0,859015	0,53973
13	0,146578	0,970853	0,389805	0,149001	0,814067	0,584708
14	0,159163	0,935276	0,41979	0,162202	0,770564	0,629685
15	0,17192	0,900467	0,449775	0,175671	0,728525	0,674663
16	0,184843	0,866431	0,47976	0,189409	0,687963	0,71964
17	0,197928	0,833173	0,509745	0,203417	0,648885	0,764618
18	0,211168	0,800696	0,53973	0,217696	0,611296	0,809595
19	0,22456	0,769002	0,569715	0,232244	0,575194	0,854573
20	0,238095	0,738092	0,5997	0,247059	0,540575	0,89955
21	0,251768	0,707968	0,629685	0,262139	0,507428	0,944528
22	0,265572	0,678627	0,65967	0,277479	0,47574	0,989505
23	0,279499	0,650069	0,689655	0,293074	0,445492	1,034483
24	0,293542	0,622291	0,71964	0,308917	0,416663	1,07946
25	0,307692	0,595291	0,749625	0,325	0,389228	1,124438
26	0,321942	0,569064	0,77961	0,341313	0,363159	1,169415
27	0,336281	0,543605	0,809595	0,357846	0,338425	1,214393
28	0,350701	0,51891	0,83958	0,374584	0,314991	1,25937
29	0,365193	0,494971	0,869565	0,391515	0,292822	1,304348
30	0,379747	0,471782	0,89955	0,408621	0,271881	1,349325
31	0,394352	0,449336	0,929535	0,425884	0,252127	1,394303
32	0,408998	0,427624	0,95952	0,443286	0,233519	1,43928
33	0,423674	0,406636	0,989505	0,460805	0,216017	1,484258
34	0,43837	0,386365	1,01949	0,478418	0,199577	1,529235
35	0,453074	0,366799	1,049475	0,496101	0,184157	1,574213
36	0,467775	0,347928	1,07946	0,513828	0,169712	1,61919
37	0,482462	0,329741	1,109445	0,531572	0,156201	1,664168
38	0,497122	0,312228	1,13943	0,549304	0,143579	1,709145

39	0,511744	0,295375	1,169415	0,566995	0,131804	1,754123
40	0,526316	0,279171	1,1994	0,584615	0,120835	1,7991
41	0,540826	0,263603	1,229385	0,602133	0,11063	1,844078
42	0,555262	0,248658	1,25937	0,619516	0,101148	1,889055
43	0,569612	0,234324	1,289355	0,636734	0,09235	1,934033
44	0,583864	0,220587	1,31934	0,653754	0,084197	1,97901
45	0,598007	0,207433	1,349325	0,670545	0,076654	2,023988
46	0,612028	0,194848	1,37931	0,687075	0,069682	2,068966
47	0,625916	0,182819	1,409295	0,703314	0,063249	2,113943
48	0,639659	0,171332	1,43928	0,719233	0,057321	2,158921
49	0,653246	0,160372	1,469265	0,734804	0,051865	2,203898
50	0,666667	0,149925	1,49925	0,75	0,046852	2,248876
51	0,679909	0,139977	1,529235	0,764796	0,042251	2,293853
52	0,692964	0,130514	1,55922	0,779169	0,038036	2,338831
53	0,70582	0,121521	1,589205	0,793099	0,034179	2,383808
54	0,718467	0,112985	1,61919	0,806566	0,030656	2,428786
55	0,730897	0,10489	1,649175	0,819554	0,027443	2,473763
56	0,7431	0,097223	1,67916	0,83205	0,024517	2,518741
57	0,755067	0,08997	1,709145	0,844043	0,021857	2,563718
58	0,76679	0,083116	1,73913	0,855523	0,019443	2,608696
59	0,778261	0,076648	1,769115	0,866484	0,017256	2,653673
60	0,789474	0,070553	1,7991	0,876923	0,015279	2,698651
61	0,80042	0,064816	1,829085	0,886839	0,013494	2,743628
62	0,811094	0,059424	1,85907	0,896233	0,011887	2,788606
63	0,821489	0,054364	1,889055	0,905109	0,010442	2,833583
64	0,831601	0,049623	1,91904	0,913472	0,009147	2,878561
65	0,841424	0,045188	1,949025	0,92133	0,007987	2,923538
66	0,850954	0,041047	1,97901	0,928694	0,006952	2,968516
67	0,860187	0,037186	2,008996	0,935574	0,006031	3,013493
68	0,869121	0,033594	2,038981	0,941983	0,005212	3,058471
69	0,877751	0,030258	2,068966	0,947936	0,004488	3,103448
70	0,886076	0,027168	2,098951	0,953448	0,003848	3,148426
71	0,894094	0,02431	2,128936	0,958536	0,003285	3,193403
72	0,901804	0,021675	2,158921	0,963217	0,002791	3,238381
73	0,909204	0,019251	2,188906	0,967509	0,00236	3,283358
74	0,916295	0,017027	2,218891	0,97143	0,001984	3,328336
75	0,923077	0,014993	2,248876	0,975	0,001658	3,373313
76	0,92955	0,013137	2,278861	0,978237	0,001378	3,418291
77	0,935715	0,011452	2,308846	0,98116	0,001136	3,463268
78	0,941574	0,009925	2,338831	0,983788	0,000931	3,508246
79	0,947129	0,008549	2,368816	0,98614	0,000756	3,553223
80	0,952381	0,007313	2,398801	0,988235	0,000608	3,598201
81	0,957334	0,006209	2,428786	0,990091	0,000485	3,643178
82	0,96199	0,005228	2,458771	0,991725	0,000382	3,688156
83	0,966352	0,004361	2,488756	0,993155	0,000297	3,733133
84	0,970425	0,0036	2,518741	0,994398	0,000228	3,778111
85	0,974212	0,002938	2,548726	0,99547	0,000173	3,823088
86	0,977717	0,002365	2,578711	0,996386	0,000128	3,868066
87	0,980945	0,001875	2,608696	0,997161	9,33E-05	3,913043
88	0,9839	0,00146	2,638681	0,997809	6,63E-05	3,958021
89	0,986587	0,001113	2,668666	0,998345	4,59E-05	4,002999
90	0,989011	0,000828	2,698651	0,99878	3,07E-05	4,047976
91	0,991177	0,000598	2,728636	0,999128	1,97E-05	4,092954
92	0,993092	0,000416	2,758621	0,9994	1,20E-05	4,137931
93	0,994759	0,000276	2,788606	0,999606	6,92E-06	4,182909
94	0,996185	0,000172	2,818591	0,999757	3,66E-06	4,227886
95	0,997375	9,85E-05	2,848576	0,999862	1,73E-06	4,272864
96	0,998336	4,99E-05	2,878561	0,999931	6,94E-07	4,317841
97	0,999073	2,09E-05	2,908546	0,999971	2,15E-07	4,362819
98	0,999592	6,12E-06	2,938531	0,999992	4,16E-08	4,407796

99	0,999899	7,57E-07	2,968516	0,999999	2,55E-09	4,452774
----	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Продолжение таблицы Б.6.1 Зависимость коэффициента готовности интерфейса узла от интенсивности отказов при количестве интерфейсных каналов  $n$ , где  $n = 1, 2, 3, 4$

№	с = n		
	Коэффициент готовности интерфейса	Интенсивность отказов интерфейса	Интенсивность восстановления интерфейса
1	0,010101	1,424906	0,05997
2	0,020408	1,351876	0,11994
3	0,030928	1,280283	0,17991
4	0,041667	1,210256	0,23988
5	0,052631	1,141928	0,29985
6	0,063829	1,075427	0,35982
7	0,075267	1,010881	0,41979
8	0,086952	0,948407	0,47976
9	0,098893	0,888113	0,53973
10	0,111096	0,830091	0,5997
11	0,12357	0,774422	0,65967
12	0,136323	0,721167	0,71964
13	0,149362	0,670372	0,77961
14	0,162695	0,622062	0,83958
15	0,17633	0,576249	0,89955
16	0,190273	0,532923	0,95952
17	0,204533	0,492062	1,01949
18	0,219114	0,453626	1,07946
19	0,234024	0,417562	1,13943
20	0,249267	0,383808	1,1994
21	0,264847	0,352289	1,25937
22	0,280767	0,322922	1,31934
23	0,29703	0,29562	1,37931
24	0,313634	0,270287	1,43928
25	0,330579	0,246828	1,49925
26	0,34786	0,225143	1,55922
27	0,365471	0,205132	1,61919
28	0,383405	0,186697	1,67916
29	0,401648	0,169739	1,73913
30	0,420188	0,154163	1,7991
31	0,439007	0,139876	1,85907
32	0,458082	0,126788	1,91904
33	0,477389	0,114814	1,97901
34	0,496899	0,103871	2,038981
35	0,516579	0,093883	2,098951
36	0,536393	0,084776	2,158921
37	0,556299	0,07648	2,218891
38	0,576254	0,06893	2,278861
39	0,596209	0,062068	2,338831
40	0,616114	0,055834	2,398801
41	0,635914	0,050178	2,458771
42	0,655553	0,04505	2,518741
43	0,674974	0,040405	2,578711
44	0,694118	0,036201	2,638681
45	0,712927	0,032399	2,698651
46	0,731343	0,028965	2,758621
47	0,74931	0,025865	2,818591
48	0,766775	0,02307	2,878561
49	0,783687	0,020551	2,938531
50	0,8	0,018284	2,998501
51	0,815674	0,016245	3,058471
52	0,830673	0,014413	3,118441

53	0,844967	0,012769	3,178411
54	0,858533	0,011295	3,238381
55	0,871355	0,009975	3,298351
56	0,883423	0,008795	3,358321
57	0,894733	0,00774	3,418291
58	0,905287	0,006799	3,478261
59	0,915095	0,005961	3,538231
60	0,924171	0,005215	3,598201
61	0,932532	0,004552	3,658171
62	0,940204	0,003964	3,718141
63	0,947212	0,003444	3,778111
64	0,953587	0,002984	3,838081
65	0,959361	0,002578	3,898051
66	0,964568	0,002221	3,958021
67	0,969244	0,001907	4,017991
68	0,973423	0,001632	4,077961
69	0,977144	0,001392	4,137931
70	0,98044	0,001182	4,197901
71	0,983346	0,001	4,257871
72	0,985897	0,000842	4,317841
73	0,988126	0,000705	4,377811
74	0,990062	0,000588	4,437781
75	0,991736	0,000487	4,497751
76	0,993174	0,000402	4,557721
77	0,994404	0,000329	4,617691
78	0,995448	0,000267	4,677661
79	0,996329	0,000215	4,737631
80	0,997067	0,000172	4,797601
81	0,997681	0,000136	4,857571
82	0,998187	0,000106	4,917541
83	0,9986	8,22E-05	4,977511
84	0,998934	6,27E-05	5,037481
85	0,999201	4,71E-05	5,097451
86	0,999412	3,47E-05	5,157421
87	0,999576	2,51E-05	5,217391
88	0,999701	1,77E-05	5,277361
89	0,999795	1,22E-05	5,337331
90	0,999865	8,10E-06	5,397301
91	0,999914	5,17E-06	5,457271
92	0,999948	3,15E-06	5,517241
93	0,99997	1,80E-06	5,577211
94	0,999984	9,44E-07	5,637181
95	0,999993	4,43E-07	5,697151
96	0,999997	1,77E-07	5,757121
97	0,999999	5,46E-08	5,817091
98	1	1,05E-08	5,877061
99	1	6,41E-10	5,937031

В результате математического моделирования получены зависимости коэффициента готовности интерфейса от вероятностей исправной работы каналов передачи данных на векторе случайных значений вероятностей ошибок элемента сигнала. Численные результаты математического моделирования интерфейса приведены в таблице Б.6.2

Таблица Б.6.2 – Надежность интерфейса сетевого узла на векторе случайных значений вероятностей ошибок элемента сигнала, в составляющих интерфейс каналах; количество каналов  $n = 8$

№	Вероятности исправной работы каналов, составляющих интерфейс								Коэффициент готовности интерфейса	Интенсивность отказов интерфейса
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	0,8190	0,9301	0,9301	0,9301	0,9301	0,9301	0,9301	0,9301	0,999971	1,16E-07
2	0,7498	0,9535	0,9535	0,9535	0,9535	0,9535	0,9535	0,9535	0,999995	2,00E-08
3	0,7330	0,9525	0,9525	0,9525	0,9525	0,9525	0,9525	0,9525	0,999994	2,40E-08
4	0,7483	0,9546	0,9546	0,9546	0,9546	0,9546	0,9546	0,9546	0,999995	2,00E-08
5	0,7345	0,3604	0,3604	0,3604	0,3604	0,3604	0,3604	0,3604	0,734453	1,06E-03
6	0,7645	0,3567	0,3567	0,3567	0,3567	0,3567	0,3567	0,3567	0,764496	9,42E-04
7	0,7955	0,9520	0,9520	0,9520	0,9520	0,9520	0,9520	0,9520	0,999994	2,40E-08
8	0,7910	0,9642	0,9642	0,9642	0,9642	0,9642	0,9642	0,9642	0,999998	8,00E-09
9	0,8051	0,8190	0,9686	0,9686	0,9686	0,9686	0,9686	0,9686	0,999999	4,00E-09
10	0,7917	0,7498	0,9774	0,9774	0,9774	0,9774	0,9774	0,9774	1,000000	0,00E+00
11	0,7875	0,7330	0,9735	0,9735	0,9735	0,9735	0,9735	0,9735	0,999999	4,00E-09
12	0,3318	0,7483	0,9769	0,9769	0,9769	0,9769	0,9769	0,9769	1,000000	0,00E+00
13	0,3248	0,7345	0,9807	0,9807	0,9807	0,9807	0,9807	0,9807	1,000000	0,00E+00
14	0,3257	0,7645	0,9663	0,9663	0,9663	0,9663	0,9663	0,9663	0,999999	4,00E-09
15	0,3241	0,7955	0,9671	0,9671	0,9671	0,9671	0,9671	0,9671	0,999999	4,00E-09
16	0,7553	0,7910	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,999995	2,00E-08
17	0,7871	0,8051	0,8190	0,9450	0,9450	0,9450	0,9450	0,9450	0,999989	4,40E-08
18	0,7818	0,7917	0,7498	0,9465	0,9465	0,9465	0,9465	0,9465	0,999990	4,00E-08
19	0,8012	0,7875	0,7330	0,5464	0,5464	0,5464	0,5464	0,5464	0,985112	5,96E-05
20	0,7986	0,3318	0,7483	0,3671	0,3671	0,3671	0,3671	0,3671	0,936555	2,54E-04
21	0,3329	0,3248	0,7345	0,2884	0,2884	0,2884	0,2884	0,2884	0,734453	1,06E-03
22	0,2734	0,3257	0,7645	0,2357	0,2357	0,2357	0,2357	0,2357	0,764496	9,42E-04
23	0,2297	0,3241	0,7955	0,2421	0,2421	0,2421	0,2421	0,2421	0,795465	8,18E-04
24	0,1940	0,7553	0,7910	0,2456	0,2456	0,2456	0,2456	0,2456	0,936578	2,54E-04
25	0,2412	0,7871	0,8051	0,2439	0,2439	0,2439	0,2439	0,2439	0,949919	2,00E-04
26	0,1887	0,7818	0,7917	0,8190	0,2403	0,2403	0,2403	0,2403	0,987469	5,01E-05
27	0,1851	0,8012	0,7875	0,7498	0,2367	0,2367	0,2367	0,2367	0,983295	6,68E-05
28	0,1869	0,7986	0,3318	0,7330	0,2408	0,2408	0,2408	0,2408	0,931664	2,73E-04
29	0,1897	0,3329	0,3248	0,7483	0,2373	0,2373	0,2373	0,2373	0,748286	1,01E-03
30	0,1897	0,2734	0,3257	0,7345	0,2430	0,2430	0,2430	0,2430	0,734453	1,06E-03
31	0,1900	0,2297	0,3241	0,7645	0,2440	0,2440	0,2440	0,2440	0,764496	9,42E-04
32	0,1925	0,1940	0,7553	0,7955	0,1919	0,1919	0,1919	0,1919	0,937852	2,49E-04
33	0,1919	0,2412	0,7871	0,7910	0,1925	0,1925	0,1925	0,1925	0,946482	2,14E-04
34	0,2440	0,1887	0,7818	0,8051	0,8190	0,1900	0,1900	0,1900	0,988420	4,63E-05
35	0,2430	0,1851	0,8012	0,7917	0,7498	0,1897	0,1897	0,1897	0,983685	6,53E-05
36	0,2373	0,1869	0,7986	0,7875	0,7330	0,1897	0,1897	0,1897	0,981572	7,37E-05
37	0,2408	0,1897	0,3329	0,3318	0,7483	0,1869	0,1869	0,1869	0,748286	1,01E-03
38	0,2367	0,1897	0,2734	0,3248	0,7345	0,1851	0,1851	0,1851	0,734453	1,06E-03
39	0,2403	0,1900	0,2297	0,3257	0,7645	0,1887	0,1887	0,1887	0,764496	9,42E-04
40	0,2439	0,1925	0,1940	0,3241	0,7955	0,2412	0,2412	0,2412	0,795465	8,18E-04
41	0,2456	0,1919	0,2412	0,7553	0,7910	0,1940	0,1940	0,1940	0,936578	2,54E-04
42	0,2421	0,2440	0,1887	0,7871	0,8051	0,8190	0,2297	0,2297	0,988771	4,49E-05
43	0,2357	0,2430	0,1851	0,7818	0,7917	0,7498	0,2734	0,2734	0,981997	7,20E-05
44	0,2884	0,2373	0,1869	0,8012	0,7875	0,7330	0,3329	0,3329	0,981793	7,28E-05
45	0,3671	0,2408	0,1897	0,7986	0,3318	0,7483	0,7986	0,7986	0,995966	1,61E-05
46	0,5464	0,2367	0,1897	0,3329	0,3248	0,7345	0,8012	0,8012	0,986318	5,47E-05
47	0,9465	0,2403	0,1900	0,2734	0,3257	0,7645	0,7818	0,7818	0,998743	5,03E-06
48	0,9450	0,2439	0,1925	0,2297	0,3241	0,7955	0,7871	0,7871	0,998985	4,06E-06
49	0,9550	0,2456	0,1919	0,1940	0,7553	0,7910	0,7553	0,7553	0,998772	4,91E-06
50	0,9671	0,2421	0,2440	0,2412	0,7871	0,8051	0,8190	0,3241	0,999528	1,89E-06
51	0,9663	0,2357	0,2430	0,1887	0,7818	0,7917	0,7498	0,3257	0,999185	3,26E-06
52	0,9807	0,2884	0,2373	0,1851	0,8012	0,7875	0,7330	0,3248	0,999533	1,87E-06
53	0,9769	0,3671	0,2408	0,1869	0,7986	0,3318	0,7483	0,3318	0,998057	7,77E-06
54	0,9735	0,5464	0,2367	0,1897	0,3329	0,3248	0,7345	0,7875	0,997879	8,48E-06
55	0,9774	0,9465	0,2403	0,1897	0,2734	0,3257	0,7645	0,7917	0,999897	4,12E-07
56	0,9686	0,9450	0,2439	0,1900	0,2297	0,3241	0,7955	0,8051	0,999887	4,52E-07
57	0,9642	0,9550	0,2456	0,1925	0,1940	0,7553	0,7910	0,7910	0,999882	4,72E-07
58	0,9520	0,9671	0,2421	0,1919	0,2412	0,7871	0,8051	0,8190	0,999911	3,56E-07
59	0,3567	0,9663	0,2357	0,2440	0,1887	0,7818	0,7917	0,7498	0,999185	3,26E-06
60	0,3604	0,9807	0,2884	0,2430	0,1851	0,8012	0,7875	0,7330	0,999533	1,87E-06
61	0,9546	0,9769	0,3671	0,2373	0,1869	0,7986	0,3318	0,7483	0,999907	3,72E-07
62	0,9525	0,9735	0,5464	0,2408	0,1897	0,3329	0,3248	0,7345	0,999604	1,58E-06
63	0,9535	0,9774	0,9465	0,2367	0,1897	0,2734	0,3257	0,7645	0,999981	7,60E-08
64	0,9301	0,9686	0,9450	0,2403	0,1900	0,2297	0,3241	0,7955	0,999965	1,40E-07

**Б.7 Численные результаты математического моделирования надежности трассы передачи данных**

Для выполнения математического моделирования надежности трассы передачи данных были установлены следующие условия и приняты следующие исходные данные (таблица Б.7.1).

Таблица Б.7.1 Интенсивности отказов и восстановлений физического канала

№	Интенсивность отказов физического канала	Интенсивность восстановления физического канала
1	1,484257871	0,014993
2	1,469265367	0,029985
3	1,454272864	0,044978
4	1,43928036	0,05997
5	1,424287856	0,074963
6	1,409295352	0,089955
7	1,394302849	0,104948
8	1,379310345	0,11994
9	1,364317841	0,134933
10	1,349325337	0,149925
11	1,334332834	0,164918
12	1,31934033	0,17991
13	1,304347826	0,194903
14	1,289355322	0,209895
15	1,274362819	0,224888
16	1,259370315	0,23988
17	1,244377811	0,254873
18	1,229385307	0,269865
19	1,214392804	0,284858
20	1,1994003	0,29985
21	1,184407796	0,314843
22	1,169415292	0,329835
23	1,154422789	0,344828
24	1,139430285	0,35982
25	1,124437781	0,374813
26	1,109445277	0,389805
27	1,094452774	0,404798
28	1,07946027	0,41979
29	1,064467766	0,434783
30	1,049475262	0,449775
31	1,034482759	0,464768
32	1,019490255	0,47976
33	1,004497751	0,494753
34	0,989505247	0,509745
35	0,974512744	0,524738
36	0,95952024	0,53973
37	0,944527736	0,554723
38	0,929535232	0,569715
39	0,914542729	0,584708
40	0,899550225	0,5997
41	0,884557721	0,614693
42	0,869565217	0,629685
43	0,854572714	0,644678
44	0,83958021	0,65967
45	0,824587706	0,674663
46	0,809595202	0,689655
47	0,794602699	0,704648
48	0,779610195	0,71964
49	0,764617691	0,734633
50	0,749625187	0,749625
51	0,734632684	0,764618

52	0,71964018	0,77961
53	0,704647676	0,794603
54	0,689655172	0,809595
55	0,674662669	0,824588
56	0,659670165	0,83958
57	0,644677661	0,854573
58	0,629685157	0,869565
59	0,614692654	0,884558
60	0,59970015	0,89955
61	0,584707646	0,914543
62	0,569715142	0,929535
63	0,554722639	0,944528
64	0,539730135	0,95952
65	0,524737631	0,974513
66	0,509745127	0,989505
67	0,494752624	1,004498
68	0,47976012	1,01949
69	0,464767616	1,034483
70	0,449775112	1,049475
71	0,434782609	1,064468
72	0,419790105	1,07946
73	0,404797601	1,094453
74	0,389805097	1,109445
75	0,374812594	1,124438
76	0,35982009	1,13943
77	0,344827586	1,154423
78	0,329835082	1,169415
79	0,314842579	1,184408
80	0,299850075	1,1994
81	0,284857571	1,214393
82	0,269865067	1,229385
83	0,254872564	1,244378
84	0,23988006	1,25937
85	0,224887556	1,274363
86	0,209895052	1,289355
87	0,194902549	1,304348
88	0,179910045	1,31934
89	0,164917541	1,334333
90	0,149925037	1,349325
91	0,134932534	1,364318
92	0,11994003	1,37931
93	0,104947526	1,394303
94	0,089955022	1,409295
95	0,074962519	1,424288
96	0,059970015	1,43928
97	0,044977511	1,454273
98	0,029985007	1,469265
99	0,014992504	1,484258

Численные результаты математического моделирования: значения коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений трассы передачи данных при различном количестве  $n = 1, 2, 3, 4$  интерфейсных каналов в составах интерфейсов узлов приведены в таблице Б.7.2.

Таблица Б.7.2 Коэффициент готовности трассы передачи данных, состоящей из  $n$  каналов передачи данных, где  $n = 1, 2, 3, 4$  и количестве повторных попыток в канале передачи данных  $r = 1$

№	n = 1			n = 2		
	Коэффициент готовности трассы передачи данных	Интенсивность отказов трассы передачи данных	Интенсивность восстановления трассы передачи данных	Коэффициент готовности трассы передачи данных	Интенсивность отказов трассы передачи данных	Интенсивность восстановления трассы передачи данных
1	0,000102	2,938831	0,00029982	0,000408	2,909151	0,001187
2	0,000416	2,87976	0,001198921	0,001663	2,821037	0,0047
3	0,000955	2,821289	0,002696224	0,003812	2,73419	0,010461
4	0,00173	2,763418	0,004789937	0,006897	2,648644	0,018394
5	0,002756	2,706147	0,007477558	0,010959	2,564429	0,028415
6	0,004043	2,649475	0,010755881	0,016036	2,481573	0,040444
7	0,005606	2,593403	0,014621011	0,022161	2,400105	0,054395
8	0,007457	2,537931	0,019068367	0,029362	2,320048	0,070183
9	0,00961	2,483058	0,024092705	0,037662	2,241428	0,08772
10	0,012076	2,428786	0,029688126	0,047076	2,164264	0,106919
11	0,014869	2,375112	0,035848097	0,057616	2,088578	0,127692
12	0,018001	2,322039	0,042565468	0,069283	2,014387	0,149951
13	0,021485	2,269565	0,049832494	0,082072	1,941707	0,173609
14	0,025333	2,217691	0,057640854	0,095972	1,870552	0,198578
15	0,029556	2,166417	0,065981679	0,11096	1,800933	0,224773
16	0,034167	2,115742	0,074845573	0,127009	1,732862	0,252109
17	0,039175	2,065667	0,084222638	0,144081	1,666346	0,280504
18	0,044592	2,016192	0,094102503	0,162132	1,601392	0,309877
19	0,050427	1,967316	0,104474353	0,181108	1,538004	0,340149
20	0,056689	1,91904	0,115326952	0,200951	1,476185	0,371243
21	0,063387	1,871364	0,126648677	0,221595	1,415935	0,403086
22	0,070529	1,824288	0,138427543	0,242968	1,357253	0,435608
23	0,07812	1,777811	0,150651239	0,264992	1,300137	0,468739
24	0,086167	1,731934	0,163307151	0,287588	1,244582	0,502415
25	0,094675	1,686657	0,176382397	0,310669	1,190581	0,536574
26	0,103646	1,641979	0,189863854	0,33415	1,138127	0,571157
27	0,113085	1,597901	0,20373819	0,357941	1,08721	0,606109
28	0,122991	1,554423	0,217991894	0,381954	1,037819	0,641376
29	0,133366	1,511544	0,232611303	0,406101	0,989942	0,676911
30	0,144208	1,469265	0,24758263	0,430294	0,943565	0,712666
31	0,155513	1,427586	0,262892001	0,454448	0,898672	0,748599
32	0,167279	1,386507	0,278525469	0,478482	0,855247	0,784671
33	0,1795	1,346027	0,294469052	0,502316	0,813273	0,820843
34	0,192169	1,306147	0,310708754	0,525878	0,772729	0,857082
35	0,205276	1,266867	0,327230594	0,549098	0,733598	0,893358
36	0,218814	1,228186	0,344020624	0,571912	0,695856	0,929641
37	0,232769	1,190105	0,36106496	0,594261	0,659483	0,965905
38	0,24713	1,152624	0,378349797	0,616094	0,624455	1,002128
39	0,261882	1,115742	0,395861439	0,637363	0,59075	1,038288
40	0,277008	1,07946	0,41358631	0,658027	0,558342	1,074366
41	0,292492	1,043778	0,431510981	0,678052	0,527206	1,110346
42	0,308316	1,008696	0,449622179	0,697409	0,497317	1,146212
43	0,324458	0,974213	0,467906818	0,716074	0,468648	1,181953
44	0,340897	0,94033	0,486351998	0,734029	0,441174	1,217556
45	0,357612	0,907046	0,504945033	0,751262	0,414865	1,253012
46	0,374578	0,874363	0,523673455	0,767763	0,389696	1,288314
47	0,39177	0,842279	0,542525035	0,78353	0,365638	1,323454
48	0,409163	0,810795	0,561487787	0,798562	0,342664	1,358427
49	0,426731	0,77991	0,58054998	0,812865	0,320744	1,393229
50	0,444444	0,749625	0,59970015	0,826446	0,29985	1,427857

51	0,462277	0,71994	0,618927105	0,839316	0,279954	1,46231
52	0,480199	0,690855	0,638219933	0,851487	0,261028	1,496585
53	0,498181	0,662369	0,657568008	0,862976	0,243043	1,530682
54	0,516195	0,634483	0,676960993	0,8738	0,225969	1,564603
55	0,53421	0,607196	0,696388849	0,883979	0,20978	1,598347
56	0,552197	0,58051	0,715841836	0,893534	0,194446	1,631917
57	0,570126	0,554423	0,73531051	0,902485	0,179939	1,665314
58	0,587967	0,528936	0,754785732	0,910857	0,166232	1,698542
59	0,605691	0,504048	0,774258668	0,918671	0,153297	1,731604
60	0,623269	0,47976	0,793720787	0,925952	0,141106	1,764502
61	0,640672	0,456072	0,813163858	0,932724	0,129632	1,797242
62	0,657873	0,432984	0,832579954	0,939011	0,118848	1,829826
63	0,674844	0,410495	0,851961448	0,944835	0,108729	1,862259
64	0,69156	0,388606	0,871301012	0,950222	0,099247	1,894546
65	0,707994	0,367316	0,890591611	0,955194	0,090377	1,92669
66	0,724123	0,346627	0,909826502	0,959774	0,082093	1,958698
67	0,739922	0,326537	0,928999231	0,963984	0,074372	1,990573
68	0,755371	0,307046	0,948103629	0,967845	0,067187	2,022321
69	0,770447	0,288156	0,967133804	0,97138	0,060516	2,053946
70	0,785131	0,269865	0,986084139	0,974607	0,054335	2,085454
71	0,799404	0,252174	1,00494929	0,977547	0,048621	2,116849
72	0,81325	0,235082	1,023724176	0,980219	0,04335	2,148137
73	0,826652	0,218591	1,042403973	0,98264	0,038502	2,179322
74	0,839597	0,202699	1,060984111	0,984828	0,034054	2,21041
75	0,852071	0,187406	1,07946027	0,986799	0,029985	2,241404
76	0,864063	0,172714	1,097828368	0,988569	0,026275	2,272311
77	0,875563	0,158621	1,11608456	0,990153	0,022903	2,303134
78	0,886562	0,145127	1,134225227	0,991566	0,019851	2,333878
79	0,897053	0,132234	1,152246978	0,992821	0,017098	2,364549
80	0,907029	0,11994	1,170146634	0,99393	0,014627	2,395149
81	0,916488	0,108246	1,187921226	0,994906	0,012419	2,425685
82	0,925424	0,097151	1,205567988	0,995761	0,010456	2,456159
83	0,933837	0,086657	1,223084354	0,996504	0,008723	2,486577
84	0,941725	0,076762	1,240467946	0,997147	0,007201	2,516942
85	0,949089	0,067466	1,25771657	0,997699	0,005875	2,547258
86	0,955931	0,058771	1,27482821	0,998168	0,00473	2,577529
87	0,962253	0,050675	1,291801023	0,998564	0,00375	2,607759
88	0,968059	0,043178	1,30863333	0,998894	0,00292	2,637951
89	0,973354	0,036282	1,325323612	0,999166	0,002227	2,668109
90	0,978143	0,029985	1,341870501	0,999386	0,001657	2,698237
91	0,982433	0,024288	1,358272781	0,999562	0,001196	2,728337
92	0,986231	0,01919	1,374529373	0,999699	0,000831	2,758413
93	0,989545	0,014693	1,390639337	0,999802	0,000551	2,788468
94	0,992384	0,010795	1,406601859	0,999878	0,000344	2,818505
95	0,994758	0,007496	1,422416256	0,999931	0,000197	2,848526
96	0,996675	0,004798	1,438081958	0,999965	9,99E-05	2,878536
97	0,998147	0,002699	1,453598514	0,999986	4,17E-05	2,908535
98	0,999184	0,001199	1,468965578	0,999996	1,22E-05	2,938528
99	0,999798	0,0003	1,484182912	0,999999	1,51E-06	2,968515

Продолжение таблицы Б.7.2 Коэффициент готовности трассы передачи данных, состоящей из  $n$  каналов передачи данных, где  $n = 1, 2, 3, 4$  и количестве повторных попыток в канале передачи данных  $r = 1$

№	n = 3			n = 4		
	Коэффициент готовности	Интенсивность отказов трассы	Интенсивность восстановления	Коэффициент готовности	Интенсивность отказов трассы	Интенсивность восстановления

	трассы передачи данных	передачи данных	трассы передачи данных	трассы передачи данных	передачи данных	трассы передачи данных
1	0,000918	2,879478	0,002645	0,001631	2,849812	0,004656
2	0,003739	2,762363	0,010367	0,006641	2,703752	0,018075
3	0,008558	2,647261	0,022851	0,015181	2,560566	0,03947
4	0,015458	2,534277	0,039789	0,027363	2,420512	0,068097
5	0,024504	2,423515	0,060877	0,043253	2,283855	0,103248
6	0,035744	2,315073	0,085817	0,062852	2,150855	0,144251
7	0,049204	2,209046	0,114318	0,086096	2,021763	0,190465
8	0,064885	2,105523	0,146096	0,112847	1,896815	0,241277
9	0,082762	2,004587	0,180873	0,142887	1,776225	0,29611
10	0,102782	1,906314	0,218381	0,175923	1,660183	0,354414
11	0,124863	1,810775	0,258358	0,211592	1,548844	0,415677
12	0,148894	1,718031	0,300554	0,24947	1,442334	0,479421
13	0,174736	1,628134	0,34473	0,289088	1,340743	0,545205
14	0,202226	1,541128	0,390656	0,329945	1,244125	0,612626
15	0,231175	1,45705	0,438116	0,371532	1,152498	0,681323
16	0,261379	1,375925	0,486904	0,413345	1,065847	0,750973
17	0,292614	1,29777	0,53683	0,454904	0,984124	0,82129
18	0,324649	1,222591	0,587714	0,49577	0,907251	0,89203
19	0,357246	1,150388	0,639392	0,535553	0,835125	0,962981
20	0,390167	1,08115	0,691712	0,573921	0,767616	1,033966
21	0,423178	1,014856	0,744535	0,610605	0,704578	1,10484
22	0,456053	0,951479	0,797735	0,645399	0,645845	1,175484
23	0,488583	0,890984	0,851201	0,678158	0,591239	1,245807
24	0,520569	0,833326	0,904831	0,708791	0,540574	1,315737
25	0,551837	0,778457	0,958537	0,73726	0,493656	1,385223
26	0,58223	0,726319	1,012241	0,763569	0,450285	1,454229
27	0,611614	0,67685	1,065875	0,787758	0,410264	1,522734
28	0,639879	0,629982	1,119382	0,809893	0,373393	1,590728
29	0,666936	0,585645	1,172713	0,830065	0,339478	1,65821
30	0,692719	0,543761	1,225827	0,848378	0,308325	1,725186
31	0,71718	0,504253	1,278692	0,864947	0,279751	1,791668
32	0,740292	0,467039	1,331282	0,879893	0,253576	1,857674
33	0,762045	0,432034	1,383576	0,893338	0,229628	1,923222
34	0,782443	0,399154	1,43556	0,905403	0,207743	1,988335
35	0,801506	0,368313	1,487223	0,916206	0,187766	2,053036
36	0,819261	0,339424	1,53856	0,92586	0,169551	2,117349
37	0,835749	0,312401	1,589569	0,934472	0,152959	2,181299
38	0,851013	0,287158	1,64025	0,942143	0,137861	2,244909
39	0,865108	0,263609	1,690607	0,948965	0,124135	2,308203
40	0,878087	0,24167	1,740646	0,955025	0,111668	2,371205
41	0,89001	0,221259	1,790374	0,960401	0,100356	2,433935
42	0,900937	0,202295	1,8398	0,965166	0,090099	2,496415
43	0,91093	0,184699	1,888935	0,969384	0,080809	2,558665
44	0,920047	0,168395	1,937789	0,973116	0,072401	2,620704
45	0,92835	0,153307	1,986373	0,976414	0,064799	2,682548
46	0,935897	0,139365	2,034701	0,979327	0,05793	2,744214
47	0,942742	0,126499	2,082785	0,981896	0,05173	2,805717
48	0,948941	0,114642	2,130636	0,984162	0,046139	2,867072
49	0,954544	0,10373	2,178267	0,986158	0,041102	2,928291
50	0,9596	0,093703	2,225691	0,987916	0,036567	2,989387
51	0,964155	0,084502	2,27292	0,989461	0,032489	3,05037
52	0,968251	0,076071	2,319966	0,99082	0,028826	3,111251
53	0,971929	0,068358	2,36684	0,992013	0,025538	3,172039
54	0,975226	0,061312	2,413554	0,993061	0,02259	3,232743
55	0,978177	0,054886	2,460117	0,993979	0,01995	3,293371
56	0,980813	0,049034	2,506542	0,994783	0,017589	3,353929
57	0,983165	0,043714	2,552836	0,995487	0,01548	3,414425

58	0,985259	0,038886	2,59901	0,996102	0,013598	3,474865
59	0,98712	0,034513	2,645073	0,996639	0,011921	3,535253
60	0,988772	0,030558	2,691033	0,997108	0,01043	3,595595
61	0,990235	0,026989	2,736898	0,997516	0,009104	3,655896
62	0,991529	0,023774	2,782675	0,997871	0,007929	3,71616
63	0,99267	0,020885	2,828372	0,998179	0,006888	3,77639
64	0,993675	0,018293	2,873995	0,998447	0,005968	3,83659
65	0,994558	0,015975	2,91955	0,998679	0,005156	3,896762
66	0,995332	0,013905	2,965044	0,998879	0,004442	3,956911
67	0,99601	0,012061	3,010481	0,999051	0,003814	4,017038
68	0,9966	0,010425	3,055867	0,9992	0,003264	4,077145
69	0,997114	0,008975	3,101206	0,999328	0,002783	4,137235
70	0,99756	0,007696	3,146503	0,999437	0,002364	4,19731
71	0,997946	0,00657	3,191762	0,999531	0,001999	4,257371
72	0,998278	0,005582	3,236986	0,99961	0,001684	4,31742
73	0,998564	0,004719	3,282179	0,999678	0,001411	4,377458
74	0,998809	0,003968	3,327344	0,999735	0,001176	4,437487
75	0,999017	0,003317	3,372484	0,999783	0,000975	4,497507
76	0,999194	0,002755	3,417602	0,999824	0,000803	4,55752
77	0,999344	0,002273	3,4627	0,999858	0,000657	4,617527
78	0,99947	0,001861	3,507781	0,999886	0,000534	4,677528
79	0,999575	0,001511	3,552846	0,999909	0,00043	4,737524
80	0,999662	0,001216	3,597897	0,999928	0,000344	4,797515
81	0,999734	0,000969	3,642936	0,999944	0,000272	4,857503
82	0,999793	0,000764	3,687965	0,999957	0,000213	4,917488
83	0,999841	0,000595	3,732985	0,999967	0,000164	4,97747
84	0,999879	0,000457	3,777997	0,999975	0,000125	5,03745
85	0,99991	0,000345	3,823002	0,999982	9,42E-05	5,097428
86	0,999934	0,000256	3,868002	0,999987	6,95E-05	5,157404
87	0,999952	0,000187	3,912997	0,99999	5,02E-05	5,217379
88	0,999966	0,000133	3,957988	0,999993	3,55E-05	5,277352
89	0,999977	9,17E-05	4,002976	0,999995	2,44E-05	5,337325
90	0,999985	6,13E-05	4,047961	0,999997	1,62E-05	5,397297
91	0,99999	3,94E-05	4,092944	0,999998	1,03E-05	5,457269
92	0,999994	2,41E-05	4,137925	0,999999	6,29E-06	5,51724
93	0,999997	1,38E-05	4,182905	0,999999	3,59E-06	5,57721
94	0,999998	7,32E-06	4,227884	1	1,89E-06	5,637181
95	0,999999	3,46E-06	4,272863	1	8,87E-07	5,697151
96	1	1,39E-06	4,317841	1	3,54E-07	5,757121
97	1	4,30E-07	4,362818	1	1,09E-07	5,817091
98	1	8,32E-08	4,407796	1	2,10E-08	5,877061
99	1	5,10E-09	4,452773	1	1,28E-09	5,937038

Для исследования зависимости коэффициента готовности трассы передачи данных  $F_{ТПД}$ , использовались последовательности значений коэффициентов готовности интерфейсов  $\{F_{и,i}\}$ , (таблица Б.6.2, приложение Б.6). В результате моделирования получены зависимости коэффициента готовности трассы передачи данных. Численные результаты моделирования приведены в таблице Б.7.3

Таблица Б.7.3 Коэффициента готовности трассы передачи данных соседних узлов (s, k)

Номер отсчета	Интенсивность отказа интерфейса узла		Коэффициент готовности трассы ПД	Интенсивность отказа трассы ПД
	s	k		
1	1,16E-07	9,42E-04	8,05E-01	9,42E-04

2	2,00E-08	8,18E-04	8,27E-01	8,18E-04
3	2,40E-08	2,54E-04	9,39E-01	2,54E-04
4	2,00E-08	4,49E-05	9,89E-01	4,49E-05
5	1,06E-03	7,20E-05	7,75E-01	1,13E-03
6	9,42E-04	7,28E-05	7,93E-01	1,01E-03
7	2,40E-08	1,61E-05	9,96E-01	1,62E-05
8	8,00E-09	5,47E-05	9,86E-01	5,47E-05
9	4,00E-09	5,03E-06	9,99E-01	5,03E-06
10	0,00E+00	4,06E-06	9,99E-01	4,06E-06
11	4,00E-09	4,91E-06	9,99E-01	4,92E-06
12	0,00E+00	1,89E-06	1,00E+00	1,89E-06
13	0,00E+00	3,26E-06	9,99E-01	3,26E-06
14	4,00E-09	1,87E-06	1,00E+00	1,87E-06
15	4,00E-09	7,77E-06	9,98E-01	7,78E-06
16	2,00E-08	8,48E-06	9,98E-01	8,50E-06
17	4,40E-08	4,12E-07	1,00E+00	4,56E-07
18	4,00E-08	4,52E-07	1,00E+00	4,92E-07
19	5,96E-05	4,72E-07	9,85E-01	6,00E-05
20	2,54E-04	3,56E-07	9,39E-01	2,54E-04
21	1,06E-03	3,26E-06	7,85E-01	1,07E-03
22	9,42E-04	1,87E-06	8,05E-01	9,44E-04
23	8,18E-04	3,72E-07	8,26E-01	8,19E-04
24	2,54E-04	1,58E-06	9,39E-01	2,55E-04
25	2,00E-04	7,60E-08	9,51E-01	2,00E-04
26	5,01E-05	1,40E-07	9,87E-01	5,03E-05
27	6,68E-05	1,16E-07	9,83E-01	6,69E-05
28	2,73E-04	2,00E-08	9,34E-01	2,73E-04
29	1,01E-03	2,40E-08	7,95E-01	1,01E-03
30	1,06E-03	2,00E-08	7,86E-01	1,06E-03
31	9,42E-04	1,06E-03	6,60E-01	2,00E-03
32	2,49E-04	9,42E-04	7,66E-01	1,19E-03
33	2,14E-04	2,40E-08	9,48E-01	2,14E-04
34	4,63E-05	8,00E-09	9,88E-01	4,63E-05
35	6,53E-05	4,00E-09	9,84E-01	6,53E-05
36	7,37E-05	0,00E+00	9,81E-01	7,37E-05
37	1,01E-03	4,00E-09	7,95E-01	1,01E-03
38	1,06E-03	0,00E+00	7,86E-01	1,06E-03
39	9,42E-04	0,00E+00	8,05E-01	9,42E-04
40	8,18E-04	4,00E-09	8,27E-01	8,18E-04
41	2,54E-04	4,00E-09	9,39E-01	2,54E-04
42	4,49E-05	2,00E-08	9,89E-01	4,49E-05
43	7,20E-05	4,40E-08	9,82E-01	7,21E-05
44	7,28E-05	4,00E-08	9,82E-01	7,29E-05
45	1,61E-05	5,96E-05	9,81E-01	7,57E-05
46	5,47E-05	2,54E-04	9,27E-01	3,09E-04
47	5,03E-06	1,06E-03	7,85E-01	1,07E-03
48	4,06E-06	9,42E-04	8,05E-01	9,46E-04
49	4,91E-06	8,18E-04	8,26E-01	8,23E-04
50	1,89E-06	2,54E-04	9,38E-01	2,56E-04
51	3,26E-06	2,00E-04	9,50E-01	2,04E-04
52	1,87E-06	5,01E-05	9,87E-01	5,20E-05
53	7,77E-06	6,68E-05	9,81E-01	7,46E-05
54	8,48E-06	2,73E-04	9,33E-01	2,82E-04
55	4,12E-07	1,01E-03	7,95E-01	1,01E-03
56	4,52E-07	1,06E-03	7,86E-01	1,06E-03
57	4,72E-07	9,42E-04	8,05E-01	9,42E-04
58	3,56E-07	2,49E-04	9,40E-01	2,49E-04
59	3,26E-06	2,14E-04	9,47E-01	2,17E-04
60	1,87E-06	4,63E-05	9,88E-01	4,82E-05
61	3,72E-07	6,53E-05	9,83E-01	6,56E-05
62	1,58E-06	7,37E-05	9,81E-01	7,53E-05
63	7,60E-08	1,01E-03	7,95E-01	1,01E-03
64	1,40E-07	1,06E-03	7,86E-01	1,06E-03

**Б.8 Численные результаты математического моделирования надежности линии  
передачи данных**

В результате математического моделирования получены зависимости коэффициента готовности линии передачи данных от интенсивности отказов, составляющих её элементов. Численные результаты математического моделирования: значения коэффициента готовности, интенсивностей отказов и восстановлений линии передачи данных при различном количестве каналов установления соединения  $n_{\text{ТУС}} = 1, 2, 3, 4$  и каналов передачи данных  $n_{\text{Ц}} = 1, 2, 3, 4$  приведены в таблице Б.8.1

Таблица Б.8.1 Коэффициент готовности линии передачи данных

№	Интенсивность отказов физического канала	$n_{\text{ТУС}} = n_{\text{Ц}} = 1$			$n_{\text{ТУС}} = n_{\text{Ц}} = 2$		
		Коэффициент готовности линии передачи данных	Интенсивность отказов линии передачи данных	Интенсивность восстановления линии передачи данных	Коэффициент готовности линии передачи данных	Интенсивность отказов линии передачи данных	Интенсивность восстановления линии передачи данных
1	1,484257871	3,16E-05	2,979426	9,40E-05	0,000149	2,949856	0,000438
2	1,469265367	0,000126	2,923023	0,00037	0,000596	2,864723	0,001708
3	1,454272864	0,000283	2,868964	0,000813	0,001335	2,782786	0,003719
4	1,43928036	0,000499	2,817221	0,001407	0,002354	2,704025	0,006382
5	1,424287856	0,000772	2,767765	0,002138	0,003648	2,628418	0,009624
6	1,409295352	0,0011	2,720566	0,002995	0,005214	2,555936	0,013395
7	1,394302849	0,001483	2,675594	0,003973	0,00705	2,486548	0,017656
8	1,379310345	0,00192	2,632819	0,005066	0,009159	2,42022	0,022372
9	1,364317841	0,002414	2,592208	0,006272	0,01154	2,356911	0,027515
10	1,349325337	0,002963	2,553731	0,00759	0,014189	2,296578	0,033055
11	1,334332834	0,003569	2,517353	0,009018	0,017103	2,239176	0,038962
12	1,31934033	0,004232	2,483042	0,010553	0,020274	2,184653	0,045209
13	1,304347826	0,004951	2,450763	0,012195	0,023696	2,132955	0,051768
14	1,289355322	0,005727	2,420482	0,013942	0,027357	2,084026	0,058616
15	1,274362819	0,006558	2,392163	0,015792	0,031247	2,037803	0,06573
16	1,259370315	0,007445	2,365769	0,017744	0,035356	1,994223	0,073093
17	1,244377811	0,008385	2,341262	0,019798	0,039674	1,953218	0,080692
18	1,229385307	0,009379	2,318606	0,021952	0,044188	1,914716	0,088519
19	1,214392804	0,010425	2,297761	0,024206	0,048891	1,878645	0,09657
20	1,1994003	0,011522	2,278687	0,026561	0,053774	1,844926	0,104848
21	1,184407796	0,012669	2,261344	0,029017	0,058831	1,81348	0,113358
22	1,169415292	0,013865	2,24569	0,031575	0,064057	1,784225	0,122114
23	1,154422789	0,01511	2,231682	0,034238	0,069448	1,757076	0,131133
24	1,139430285	0,016402	2,219277	0,037008	0,075004	1,731944	0,140437
25	1,124437781	0,017741	2,208431	0,039888	0,080725	1,70874	0,150052
26	1,109445277	0,019127	2,199097	0,042883	0,086614	1,687372	0,160009
27	1,094452774	0,02056	2,19123	0,045998	0,092673	1,667746	0,170341
28	1,07946027	0,022041	2,184782	0,049239	0,098907	1,649766	0,181084
29	1,064467766	0,023569	2,179704	0,052612	0,105322	1,633334	0,192278
30	1,049475262	0,025145	2,175946	0,056126	0,111925	1,618351	0,203963
31	1,034482759	0,026772	2,173457	0,059789	0,118721	1,604717	0,216179
32	1,019490255	0,028451	2,172184	0,06361	0,125718	1,59233	0,22897
33	1,004497751	0,030183	2,172075	0,067601	0,132921	1,581086	0,242376
34	0,989505247	0,031972	2,173073	0,071772	0,140335	1,570883	0,256438
35	0,974512744	0,03382	2,175124	0,076137	0,147966	1,561616	0,271194
36	0,95952024	0,035729	2,178169	0,080708	0,155817	1,55318	0,286681
37	0,944527736	0,037705	2,18215	0,085502	0,163888	1,545471	0,302932
38	0,929535232	0,039751	2,187006	0,090533	0,172181	1,538384	0,319975
39	0,914542729	0,04187	2,192675	0,09582	0,180694	1,531813	0,337835
40	0,899550225	0,044069	2,199093	0,101379	0,189424	1,525654	0,356531
41	0,884557721	0,046351	2,206196	0,10723	0,198364	1,519803	0,376075
42	0,869565217	0,048724	2,213917	0,113395	0,207509	1,514157	0,396473

43	0,854572714	0,051191	2,222187	0,119894	0,216849	1,508613	0,417723
44	0,83958021	0,053761	2,230936	0,126752	0,226373	1,50307	0,439817
45	0,824587706	0,05644	2,240092	0,133992	0,23607	1,497428	0,462735
46	0,809595202	0,059234	2,249582	0,141641	0,245926	1,491589	0,486452
47	0,794602699	0,062151	2,259329	0,149726	0,255929	1,485456	0,510933
48	0,779610195	0,0652	2,269255	0,158275	0,266062	1,478935	0,536134
49	0,764617691	0,068388	2,279282	0,167317	0,276313	1,471934	0,562003
50	0,749625187	0,071724	2,289326	0,176886	0,286665	1,464363	0,588478
51	0,734632684	0,075216	2,299303	0,187011	0,297106	1,456135	0,615492
52	0,71964018	0,078875	2,309128	0,197728	0,30762	1,447166	0,642968
53	0,704647676	0,082709	2,31871	0,20907	0,318197	1,437376	0,670822
54	0,689655172	0,086728	2,32796	0,221074	0,328824	1,426686	0,698967
55	0,674662669	0,090943	2,336783	0,233775	0,339493	1,415024	0,727305
56	0,659670165	0,095364	2,345082	0,24721	0,350193	1,40232	0,755738
57	0,644677661	0,1	2,352759	0,261418	0,36092	1,388508	0,78416
58	0,629685157	0,104863	2,359712	0,276433	0,371668	1,373528	0,812463
59	0,614692654	0,109962	2,365835	0,292295	0,382433	1,357323	0,840534
60	0,59970015	0,11531	2,371021	0,309037	0,393215	1,339843	0,868258
61	0,584707646	0,120915	2,37516	0,326696	0,404012	1,321041	0,895516
62	0,569715142	0,126789	2,378137	0,345302	0,414827	1,300878	0,922187
63	0,554722639	0,132942	2,379834	0,364888	0,425661	1,279319	0,948146
64	0,539730135	0,139383	2,380131	0,385479	0,436519	1,256337	0,973264
65	0,524737631	0,146123	2,378903	0,407098	0,447405	1,231911	0,997408
66	0,509745127	0,15317	2,376022	0,429762	0,458323	1,206027	1,020442
67	0,494752624	0,160534	2,371355	0,453483	0,469279	1,178677	1,042222
68	0,47976012	0,168223	2,364768	0,478265	0,480279	1,149862	1,062598
69	0,464767616	0,176247	2,356119	0,504104	0,491327	1,119592	1,081414
70	0,449775112	0,184611	2,345264	0,530988	0,502429	1,087883	1,098503
71	0,434782609	0,193325	2,332053	0,558891	0,513587	1,054761	1,113687
72	0,419790105	0,202395	2,316334	0,587779	0,524805	1,020263	1,12678
73	0,404797601	0,21183	2,297947	0,617602	0,536085	0,984433	1,137578
74	0,389805097	0,221638	2,27673	0,648298	0,547425	0,947326	1,145866
75	0,374812594	0,231827	2,252512	0,679787	0,558824	0,909008	1,151414
76	0,35982009	0,242408	2,22512	0,711974	0,570277	0,869556	1,153972
77	0,344827586	0,25339	2,194374	0,744745	0,581777	0,829059	1,153278
78	0,329835082	0,26479	2,160088	0,777967	0,593313	0,787617	1,14905
79	0,314842579	0,276622	2,12207	0,811486	0,604872	0,745344	1,140991
80	0,299850075	0,288908	2,080121	0,845127	0,616436	0,702368	1,128794
81	0,284857571	0,301672	2,034036	0,878688	0,627984	0,658828	1,11214
82	0,269865067	0,314946	1,983604	0,911942	0,639491	0,61488	1,09071
83	0,254872564	0,328769	1,928604	0,94463	0,650926	0,570696	1,06419
84	0,23988006	0,343187	1,86881	0,97646	0,662254	0,526461	1,032288
85	0,224887556	0,358258	1,803988	1,007094	0,673435	0,48238	0,994751
86	0,209895052	0,374054	1,733893	1,036141	0,684421	0,438673	0,951386
87	0,194902549	0,390658	1,658275	1,063145	0,695163	0,39558	0,902098
88	0,179910045	0,408176	1,576872	1,087555	0,705603	0,35336	0,846922
89	0,164917541	0,426732	1,489414	1,108699	0,715677	0,312291	0,786076
90	0,149925037	0,446479	1,395622	1,12573	0,725317	0,272674	0,720012
91	0,134932534	0,467598	1,295206	1,137555	0,734449	0,234831	0,649485
92	0,11994003	0,490313	1,187863	1,142713	0,742994	0,199107	0,57561
93	0,104947526	0,514893	1,073283	1,139185	0,750868	0,165873	0,499929
94	0,089955022	0,541667	0,951141	1,124077	0,757984	0,135523	0,424451
95	0,074962519	0,571039	0,8211	1,093059	0,764252	0,108479	0,351671
96	0,059970015	0,603509	0,682811	1,039322	0,769581	0,085194	0,284539
97	0,044977511	0,639701	0,535911	0,951496	0,773878	0,066145	0,226373
98	0,029985007	0,680405	0,380024	0,809057	0,777052	0,051845	0,180697
99	0,014992504	0,726631	0,214756	0,570833	0,779017	0,042837	0,151011

Продолжение таблицы Б.8.1 Коэффициент готовности линии передачи данных

№	$n_{\text{ТУС}} = n_{\text{И}} = 3$			$n_{\text{ТУС}} = n_{\text{И}} = 4$		
	Коэффициент готовности линии передачи данных	Интенсивность отказов линии передачи данных	Интенсивность восстановления линии передачи данных	Коэффициент готовности линии передачи данных	Интенсивность отказов линии передачи данных	Интенсивность восстановления линии передачи данных
1	0,000348	2,920413	0,001018	0,000627	2,891015	0,001812
2	0,001393	2,806953	0,003915	0,002496	2,749401	0,00688
3	0,00311	2,697854	0,008417	0,005551	2,613503	0,01459
4	0,005472	2,593141	0,014268	0,009734	2,483467	0,02441
5	0,008462	2,492831	0,021276	0,015004	2,359435	0,035941
6	0,012073	2,396932	0,029291	0,021331	2,24154	0,048857
7	0,016295	2,305445	0,038188	0,028672	2,129894	0,06287
8	0,021116	2,21836	0,047853	0,036964	2,024589	0,077708
9	0,026516	2,135657	0,058172	0,046126	1,925688	0,093119
10	0,032469	2,057307	0,06904	0,056062	1,833222	0,108878
11	0,038939	1,983268	0,080356	0,066666	1,747187	0,124797
12	0,045889	1,91349	0,092032	0,077829	1,66754	0,140737
13	0,053278	1,847909	0,103993	0,089449	1,594201	0,156609
14	0,061063	1,786452	0,11618	0,101434	1,52705	0,172379
15	0,069205	1,729033	0,128554	0,113704	1,46593	0,188066
16	0,077667	1,675557	0,141094	0,1262	1,410648	0,203735
17	0,086418	1,625917	0,153799	0,138876	1,360977	0,219489
18	0,095431	1,579996	0,166687	0,151701	1,316663	0,235459
19	0,104686	1,537666	0,179793	0,164656	1,277423	0,251795
20	0,114167	1,498792	0,193167	0,177727	1,242952	0,268653
21	0,123867	1,463227	0,20687	0,190904	1,212928	0,286187
22	0,133779	1,430818	0,220975	0,204175	1,187015	0,304538
23	0,143901	1,401405	0,23556	0,217526	1,164867	0,323831
24	0,154231	1,37482	0,250707	0,230936	1,146132	0,344163
25	0,16477	1,350889	0,266496	0,244378	1,130456	0,365605
26	0,175514	1,329435	0,283006	0,257821	1,117488	0,388197
27	0,18646	1,310276	0,30031	0,271227	1,10688	0,411948
28	0,197599	1,293226	0,31847	0,284561	1,098292	0,436838
29	0,20892	1,2781	0,33754	0,297784	1,091392	0,462819
30	0,220407	1,264709	0,357559	0,310862	1,085863	0,489819
31	0,232039	1,252864	0,378552	0,323765	1,081398	0,517747
32	0,243793	1,242379	0,400529	0,336469	1,077709	0,546494
33	0,255641	1,233068	0,423482	0,348958	1,074521	0,575942
34	0,267555	1,224748	0,447388	0,361221	1,071578	0,605962
35	0,279505	1,217238	0,472208	0,373254	1,068641	0,636423
36	0,29146	1,210363	0,497885	0,385062	1,06549	0,667189
37	0,303391	1,203952	0,524352	0,396651	1,061924	0,698126
38	0,315272	1,197839	0,551526	0,408035	1,057759	0,729101
39	0,327079	1,191865	0,579316	0,419227	1,052832	0,75998
40	0,338791	1,185878	0,60762	0,430246	1,046998	0,790634
41	0,350391	1,179731	0,636332	0,44111	1,04013	0,820934
42	0,361867	1,173288	0,665338	0,451836	1,032122	0,850749
43	0,373211	1,166419	0,694524	0,462443	1,022882	0,879953
44	0,384418	1,159003	0,723774	0,472947	1,012337	0,908414
45	0,395488	1,150928	0,752968	0,483363	1,000434	0,936002
46	0,406423	1,142091	0,781992	0,493704	0,987132	0,962581
47	0,417228	1,1324	0,810727	0,50398	0,972409	0,988013
48	0,427911	1,121771	0,839061	0,514199	0,956257	1,012154
49	0,43848	1,11013	0,866878	0,524366	0,938683	1,034858
50	0,448945	1,097414	0,894064	0,534485	0,919708	1,055972
51	0,459317	1,083569	0,920507	0,544557	0,899366	1,075339
52	0,469607	1,068553	0,946093	0,554578	0,877705	1,092796
53	0,479826	1,052332	0,970705	0,564544	0,854782	1,108176
54	0,489982	1,034884	0,994227	0,574448	0,830668	1,121312
55	0,500084	1,016197	1,016539	0,584282	0,805441	1,13203

56	0,510141	0,996267	1,037516	0,594034	0,779191	1,140161
57	0,520158	0,975104	1,057029	0,603692	0,752015	1,145536
58	0,530139	0,952723	1,074947	0,61324	0,724017	1,147989
59	0,540088	0,929153	1,091129	0,622663	0,695309	1,147365
60	0,550004	0,90443	1,105432	0,631944	0,666007	1,143519
61	0,559887	0,878601	1,117707	0,641064	0,636234	1,136323
62	0,569734	0,85172	1,127798	0,650006	0,606113	1,125666
63	0,579538	0,823852	1,135547	0,658748	0,575774	1,111468
64	0,589294	0,795069	1,14079	0,667274	0,545345	1,093673
65	0,598991	0,765452	1,143362	0,675561	0,514956	1,072267
66	0,608618	0,735088	1,143098	0,683593	0,484738	1,047273
67	0,618162	0,704074	1,139834	0,691351	0,454819	1,018762
68	0,627609	0,672511	1,133413	0,698817	0,425325	0,986858
69	0,63694	0,640507	1,123686	0,705976	0,396379	0,951737
70	0,64614	0,608178	1,110517	0,712812	0,368099	0,913635
71	0,655187	0,575641	1,093789	0,719313	0,340597	0,872843
72	0,664062	0,543022	1,073411	0,725467	0,313981	0,829712
73	0,672742	0,510447	1,049322	0,731267	0,28835	0,784646
74	0,681206	0,478047	1,021501	0,736704	0,263795	0,738099
75	0,689431	0,445955	0,989973	0,741775	0,240398	0,690564
76	0,697393	0,414305	0,954816	0,746477	0,218232	0,642566
77	0,705071	0,383232	0,916174	0,750812	0,197359	0,594647
78	0,712442	0,35287	0,874256	0,754782	0,177828	0,547356
79	0,719485	0,323351	0,829352	0,758393	0,15968	0,501228
80	0,726179	0,294805	0,781827	0,761653	0,142941	0,456776
81	0,732505	0,267358	0,73213	0,764573	0,127623	0,41447
82	0,738447	0,241131	0,680789	0,767165	0,11373	0,374726
83	0,743991	0,216237	0,628409	0,769444	0,101247	0,337895
84	0,749123	0,192784	0,575656	0,771427	0,090149	0,304251
85	0,753836	0,170866	0,523248	0,773132	0,080399	0,273987
86	0,758122	0,15057	0,471934	0,774578	0,071944	0,247209
87	0,761981	0,131967	0,42247	0,775788	0,064722	0,22394
88	0,765412	0,115114	0,375593	0,776782	0,058656	0,204119
89	0,768422	0,100052	0,331991	0,777582	0,053663	0,187608
90	0,771019	0,086801	0,292274	0,778213	0,049647	0,174201
91	0,773219	0,07536	0,256944	0,778695	0,046505	0,163634
92	0,775039	0,065706	0,226372	0,779053	0,044129	0,155596
93	0,776503	0,057787	0,200771	0,779307	0,042406	0,149741
94	0,777637	0,051523	0,180183	0,779477	0,041222	0,145706
95	0,778475	0,0468	0,164465	0,779585	0,040465	0,143118
96	0,779054	0,043472	0,153283	0,779645	0,040026	0,141618
97	0,779415	0,041351	0,14611	0,779675	0,039807	0,140869
98	0,779606	0,040207	0,142227	0,779686	0,039722	0,140576
99	0,779679	0,039766	0,140724	0,779689	0,039701	0,140505

Численные результаты математического моделирования – зависимости коэффициента готовности линии передачи данных, где:  $n_{\text{ТУС}} = 4$  и  $n_{\text{И}} = 4$  при интенсивности обращений к узлу следующего перехода:  $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$  приведены в таблице Б.8.2

Таблица Б.8.2 Коэффициент готовности линии передачи данных, где:  $n_{\text{ТУС}} = 4$  и  $n_{\text{И}} = 4$  при интенсивности обращений к узлу следующего перехода:  $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$

№	Значение коэффициента готовности линии передачи данных $F_{\text{ЛПД}}$						
	$w_{\text{УСП}} = 0,01$	$w_{\text{УСП}} = 0,02$	$w_{\text{УСП}} = 0,03$	$w_{\text{УСП}} = 0,04$	$w_{\text{УСП}} = 0,05$	$w_{\text{УСП}} = 0,06$	$w_{\text{УСП}} = 0,07$
1	0,0007	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005
2	0,0030	0,0028	0,0026	0,0025	0,0024	0,0022	0,0021

3	0,0068	0,0063	0,0059	0,0055	0,0052	0,0050	0,0048
4	0,0120	0,0111	0,0103	0,0097	0,0092	0,0087	0,0083
5	0,0189	0,0172	0,0160	0,0150	0,0141	0,0134	0,0127
6	0,0272	0,0247	0,0228	0,0213	0,0200	0,0189	0,0180
7	0,0369	0,0334	0,0307	0,0286	0,0268	0,0253	0,0240
8	0,0480	0,0433	0,0397	0,0368	0,0345	0,0324	0,0307
9	0,0604	0,0543	0,0497	0,0460	0,0429	0,0403	0,0381
10	0,0738	0,0663	0,0605	0,0559	0,0520	0,0488	0,0461
11	0,0881	0,0791	0,0721	0,0664	0,0618	0,0579	0,0545
12	0,1031	0,0925	0,0842	0,0776	0,0720	0,0674	0,0634
13	0,1188	0,1065	0,0969	0,0891	0,0827	0,0773	0,0727
14	0,1349	0,1209	0,1100	0,1011	0,0937	0,0875	0,0822
15	0,1513	0,1357	0,1233	0,1133	0,1050	0,0980	0,0920
16	0,1680	0,1507	0,1369	0,1257	0,1165	0,1086	0,1019
17	0,1849	0,1659	0,1507	0,1384	0,1281	0,1194	0,1120
18	0,2020	0,1812	0,1647	0,1511	0,1399	0,1304	0,1222
19	0,2191	0,1967	0,1787	0,1641	0,1518	0,1415	0,1326
20	0,2364	0,2123	0,1929	0,1771	0,1639	0,1527	0,1430
21	0,2537	0,2279	0,2072	0,1902	0,1760	0,1640	0,1536
22	0,2712	0,2437	0,2216	0,2034	0,1882	0,1753	0,1643
23	0,2886	0,2595	0,2360	0,2167	0,2006	0,1868	0,1750
24	0,3060	0,2753	0,2505	0,2301	0,2130	0,1984	0,1858
25	0,3235	0,2912	0,2651	0,2435	0,2254	0,2099	0,1966
26	0,3408	0,3070	0,2796	0,2569	0,2378	0,2216	0,2075
27	0,3580	0,3227	0,2940	0,2703	0,2502	0,2332	0,2184
28	0,3751	0,3383	0,3084	0,2835	0,2626	0,2447	0,2292
29	0,3919	0,3537	0,3226	0,2967	0,2749	0,2562	0,2400
30	0,4084	0,3689	0,3366	0,3098	0,2870	0,2676	0,2507
31	0,4246	0,3838	0,3505	0,3226	0,2991	0,2789	0,2613
32	0,4404	0,3985	0,3640	0,3353	0,3109	0,2900	0,2718
33	0,4559	0,4128	0,3774	0,3477	0,3226	0,3009	0,2821
34	0,4710	0,4268	0,3905	0,3600	0,3341	0,3118	0,2923
35	0,4857	0,4405	0,4033	0,3720	0,3453	0,3224	0,3024
36	0,5000	0,4539	0,4158	0,3838	0,3564	0,3329	0,3123
37	0,5139	0,4670	0,4281	0,3953	0,3673	0,3432	0,3221
38	0,5275	0,4797	0,4401	0,4067	0,3781	0,3533	0,3317
39	0,5407	0,4922	0,4519	0,4178	0,3886	0,3634	0,3413
40	0,5536	0,5045	0,4635	0,4288	0,3991	0,3733	0,3507
41	0,5663	0,5165	0,4749	0,4397	0,4094	0,3831	0,3601
42	0,5787	0,5283	0,4862	0,4504	0,4196	0,3928	0,3693
43	0,5908	0,5400	0,4973	0,4610	0,4297	0,4024	0,3785
44	0,6028	0,5514	0,5082	0,4714	0,4397	0,4120	0,3877
45	0,6146	0,5628	0,5191	0,4818	0,4496	0,4215	0,3968
46	0,6263	0,5740	0,5299	0,4922	0,4595	0,4310	0,4059
47	0,6378	0,5851	0,5406	0,5024	0,4694	0,4405	0,4150
48	0,6491	0,5961	0,5512	0,5126	0,4792	0,4499	0,4240
49	0,6604	0,6070	0,5617	0,5228	0,4889	0,4593	0,4331
50	0,6716	0,6178	0,5722	0,5329	0,4987	0,4687	0,4421
51	0,6826	0,6286	0,5826	0,5429	0,5084	0,4780	0,4511
52	0,6936	0,6393	0,5929	0,5529	0,5180	0,4873	0,4601
53	0,7045	0,6499	0,6032	0,5629	0,5276	0,4966	0,4691
54	0,7152	0,6604	0,6134	0,5728	0,5372	0,5058	0,4780
55	0,7259	0,6708	0,6236	0,5826	0,5467	0,5150	0,4869
56	0,7364	0,6811	0,6336	0,5923	0,5561	0,5242	0,4957
57	0,7468	0,6913	0,6435	0,6020	0,5655	0,5332	0,5045
58	0,7571	0,7014	0,6533	0,6115	0,5747	0,5422	0,5132
59	0,7672	0,7113	0,6630	0,6209	0,5839	0,5511	0,5217
60	0,7771	0,7210	0,6725	0,6302	0,5929	0,5598	0,5302
61	0,7869	0,7306	0,6819	0,6393	0,6017	0,5684	0,5385
62	0,7964	0,7400	0,6911	0,6482	0,6104	0,5768	0,5467

63	0,8057	0,7491	0,7000	0,6570	0,6189	0,5851	0,5548
64	0,8148	0,7580	0,7087	0,6655	0,6272	0,5931	0,5626
65	0,8236	0,7667	0,7172	0,6738	0,6353	0,6010	0,5702
66	0,8321	0,7751	0,7254	0,6818	0,6431	0,6086	0,5776
67	0,8403	0,7832	0,7334	0,6895	0,6506	0,6159	0,5847
68	0,8482	0,7910	0,7410	0,6970	0,6579	0,6230	0,5916
69	0,8558	0,7984	0,7483	0,7041	0,6649	0,6298	0,5982
70	0,8630	0,8056	0,7553	0,7110	0,6716	0,6363	0,6046
71	0,8699	0,8123	0,7619	0,7175	0,6779	0,6425	0,6106
72	0,8764	0,8187	0,7682	0,7236	0,6839	0,6483	0,6163
73	0,8825	0,8248	0,7741	0,7294	0,6896	0,6538	0,6216
74	0,8882	0,8304	0,7797	0,7348	0,6949	0,6590	0,6267
75	0,8935	0,8357	0,7849	0,7399	0,6998	0,6638	0,6314
76	0,8985	0,8406	0,7897	0,7446	0,7044	0,6683	0,6358
77	0,9030	0,8451	0,7941	0,7489	0,7086	0,6724	0,6398
78	0,9072	0,8492	0,7981	0,7529	0,7125	0,6762	0,6435
79	0,9110	0,8529	0,8018	0,7565	0,7160	0,6797	0,6468
80	0,9144	0,8563	0,8051	0,7598	0,7192	0,6828	0,6499
81	0,9175	0,8593	0,8081	0,7627	0,7221	0,6856	0,6526
82	0,9202	0,8620	0,8108	0,7653	0,7246	0,6880	0,6550
83	0,9226	0,8644	0,8131	0,7675	0,7268	0,6902	0,6571
84	0,9247	0,8664	0,8151	0,7695	0,7288	0,6921	0,6590
85	0,9265	0,8682	0,8168	0,7712	0,7304	0,6937	0,6606
86	0,9280	0,8697	0,8183	0,7727	0,7318	0,6951	0,6619
87	0,9292	0,8710	0,8196	0,7739	0,7330	0,6963	0,6630
88	0,9303	0,8720	0,8206	0,7749	0,7340	0,6972	0,6640
89	0,9311	0,8728	0,8214	0,7757	0,7348	0,6980	0,6647
90	0,9318	0,8735	0,8220	0,7763	0,7354	0,6986	0,6653
91	0,9323	0,8740	0,8225	0,7768	0,7359	0,6991	0,6657
92	0,9327	0,8743	0,8229	0,7771	0,7362	0,6994	0,6661
93	0,9329	0,8746	0,8231	0,7774	0,7365	0,6996	0,6663
94	0,9331	0,8748	0,8233	0,7776	0,7366	0,6998	0,6665
95	0,9332	0,8749	0,8234	0,7777	0,7367	0,6999	0,6666
96	0,9333	0,8750	0,8235	0,7777	0,7368	0,7000	0,6666
97	0,9333	0,8750	0,8235	0,7778	0,7368	0,7000	0,6667
98	0,9333	0,8750	0,8235	0,7778	0,7368	0,7000	0,6667
99	0,9333	0,8750	0,8235	0,7778	0,7368	0,7000	0,6667

Продолжение таблицы Б.8.2 Коэффициент готовности линии передачи данных, где:  $n_{\text{ТУС}} = 4$  и  $n_{\text{И}} = 4$  при интенсивности обращений к узлу следующего перехода:  $w_{\text{УСП}} = \{0.01 \div 0.14\}$

№	Значение коэффициента готовности линии передачи данных $F_{\text{ЛПД}}$						
	$w_{\text{УСП}} = 0,08$	$w_{\text{УСП}} = 0,09$	$w_{\text{УСП}} = 0,1$	$w_{\text{УСП}} = 0,11$	$w_{\text{УСП}} = 0,12$	$w_{\text{УСП}} = 0,13$	$w_{\text{УСП}} = 0,14$
1	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004
2	0,0020	0,0020	0,0019	0,0018	0,0017	0,0017	0,0016
3	0,0045	0,0044	0,0042	0,0040	0,0039	0,0037	0,0036
4	0,0079	0,0076	0,0073	0,0070	0,0068	0,0065	0,0063
5	0,0122	0,0116	0,0112	0,0107	0,0104	0,0100	0,0097
6	0,0171	0,0164	0,0157	0,0151	0,0146	0,0141	0,0136
7	0,0228	0,0218	0,0209	0,0201	0,0193	0,0187	0,0180
8	0,0292	0,0279	0,0267	0,0256	0,0246	0,0237	0,0229
9	0,0362	0,0345	0,0330	0,0316	0,0304	0,0293	0,0282
10	0,0437	0,0416	0,0397	0,0380	0,0365	0,0351	0,0339
11	0,0516	0,0491	0,0468	0,0448	0,0430	0,0414	0,0399
12	0,0600	0,0570	0,0543	0,0519	0,0498	0,0479	0,0461
13	0,0687	0,0652	0,0621	0,0593	0,0568	0,0546	0,0525
14	0,0776	0,0736	0,0700	0,0669	0,0640	0,0615	0,0591
15	0,0868	0,0822	0,0782	0,0746	0,0714	0,0685	0,0659
16	0,0961	0,0910	0,0865	0,0825	0,0789	0,0757	0,0727

17	0,1056	0,0999	0,0950	0,0905	0,0865	0,0830	0,0797
18	0,1152	0,1090	0,1035	0,0986	0,0943	0,0903	0,0867
19	0,1249	0,1181	0,1122	0,1068	0,1021	0,0978	0,0939
20	0,1347	0,1274	0,1209	0,1151	0,1100	0,1053	0,1010
21	0,1446	0,1367	0,1297	0,1235	0,1179	0,1129	0,1083
22	0,1546	0,1461	0,1386	0,1320	0,1260	0,1206	0,1156
23	0,1647	0,1556	0,1476	0,1405	0,1341	0,1283	0,1230
24	0,1748	0,1652	0,1567	0,1491	0,1423	0,1361	0,1305
25	0,1850	0,1748	0,1658	0,1577	0,1505	0,1439	0,1380
26	0,1953	0,1845	0,1749	0,1664	0,1587	0,1518	0,1455
27	0,2055	0,1942	0,1841	0,1751	0,1670	0,1597	0,1530
28	0,2157	0,2038	0,1932	0,1838	0,1753	0,1676	0,1606
29	0,2259	0,2134	0,2023	0,1924	0,1835	0,1754	0,1681
30	0,2360	0,2230	0,2114	0,2010	0,1917	0,1833	0,1756
31	0,2460	0,2324	0,2204	0,2096	0,1999	0,1910	0,1830
32	0,2559	0,2418	0,2293	0,2180	0,2079	0,1988	0,1904
33	0,2657	0,2511	0,2381	0,2264	0,2159	0,2064	0,1978
34	0,2753	0,2602	0,2468	0,2347	0,2239	0,2140	0,2050
35	0,2848	0,2693	0,2554	0,2430	0,2317	0,2215	0,2122
36	0,2942	0,2782	0,2639	0,2511	0,2395	0,2290	0,2194
37	0,3035	0,2871	0,2724	0,2591	0,2472	0,2364	0,2265
38	0,3127	0,2958	0,2807	0,2671	0,2549	0,2437	0,2335
39	0,3218	0,3045	0,2890	0,2751	0,2624	0,2510	0,2405
40	0,3308	0,3131	0,2972	0,2829	0,2700	0,2582	0,2475
41	0,3397	0,3216	0,3054	0,2907	0,2775	0,2655	0,2544
42	0,3486	0,3301	0,3135	0,2985	0,2850	0,2727	0,2614
43	0,3574	0,3385	0,3216	0,3063	0,2925	0,2799	0,2683
44	0,3661	0,3469	0,3297	0,3141	0,2999	0,2870	0,2753
45	0,3749	0,3553	0,3377	0,3218	0,3074	0,2942	0,2822
46	0,3836	0,3637	0,3458	0,3296	0,3149	0,3015	0,2892
47	0,3923	0,3721	0,3538	0,3374	0,3224	0,3087	0,2961
48	0,4010	0,3805	0,3619	0,3451	0,3299	0,3159	0,3031
49	0,4097	0,3888	0,3700	0,3529	0,3374	0,3232	0,3102
50	0,4184	0,3972	0,3781	0,3607	0,3449	0,3305	0,3172
51	0,4271	0,4056	0,3861	0,3685	0,3525	0,3378	0,3243
52	0,4358	0,4140	0,3942	0,3763	0,3600	0,3451	0,3313
53	0,4444	0,4223	0,4023	0,3841	0,3676	0,3524	0,3384
54	0,4531	0,4306	0,4104	0,3919	0,3751	0,3597	0,3455
55	0,4617	0,4390	0,4184	0,3997	0,3826	0,3670	0,3526
56	0,4702	0,4472	0,4264	0,4075	0,3901	0,3743	0,3596
57	0,4787	0,4554	0,4344	0,4152	0,3976	0,3815	0,3667
58	0,4871	0,4636	0,4422	0,4228	0,4050	0,3887	0,3736
59	0,4954	0,4716	0,4501	0,4304	0,4124	0,3958	0,3806
60	0,5036	0,4796	0,4578	0,4379	0,4196	0,4029	0,3874
61	0,5117	0,4874	0,4654	0,4453	0,4268	0,4098	0,3942
62	0,5197	0,4951	0,4729	0,4525	0,4338	0,4167	0,4008
63	0,5274	0,5027	0,4802	0,4596	0,4408	0,4234	0,4074
64	0,5350	0,5101	0,4874	0,4666	0,4475	0,4300	0,4137
65	0,5424	0,5173	0,4943	0,4734	0,4541	0,4364	0,4200
66	0,5496	0,5243	0,5011	0,4800	0,4605	0,4426	0,4260
67	0,5566	0,5310	0,5077	0,4863	0,4667	0,4487	0,4319
68	0,5633	0,5375	0,5140	0,4925	0,4727	0,4545	0,4376
69	0,5697	0,5438	0,5201	0,4984	0,4785	0,4601	0,4430
70	0,5759	0,5498	0,5259	0,5041	0,4840	0,4654	0,4483
71	0,5817	0,5554	0,5315	0,5095	0,4892	0,4705	0,4532
72	0,5873	0,5608	0,5367	0,5146	0,4942	0,4754	0,4580
73	0,5925	0,5659	0,5417	0,5194	0,4989	0,4800	0,4624
74	0,5974	0,5707	0,5463	0,5239	0,5033	0,4843	0,4666
75	0,6020	0,5752	0,5507	0,5282	0,5074	0,4883	0,4705
76	0,6062	0,5793	0,5547	0,5321	0,5113	0,4920	0,4742

77	0,6102	0,5831	0,5584	0,5357	0,5148	0,4955	0,4775
78	0,6138	0,5867	0,5618	0,5391	0,5180	0,4986	0,4806
79	0,6170	0,5898	0,5650	0,5421	0,5210	0,5015	0,4834
80	0,6200	0,5927	0,5678	0,5448	0,5237	0,5041	0,4859
81	0,6226	0,5953	0,5703	0,5473	0,5261	0,5064	0,4882
82	0,6250	0,5976	0,5725	0,5495	0,5282	0,5085	0,4902
83	0,6271	0,5996	0,5745	0,5514	0,5300	0,5103	0,4920
84	0,6289	0,6014	0,5762	0,5530	0,5317	0,5119	0,4935
85	0,6304	0,6029	0,5777	0,5545	0,5331	0,5133	0,4949
86	0,6317	0,6042	0,5789	0,5557	0,5343	0,5144	0,4960
87	0,6328	0,6052	0,5800	0,5567	0,5353	0,5154	0,4969
88	0,6337	0,6061	0,5808	0,5575	0,5361	0,5162	0,4977
89	0,6344	0,6068	0,5815	0,5582	0,5367	0,5168	0,4984
90	0,6350	0,6074	0,5821	0,5588	0,5372	0,5173	0,4988
91	0,6355	0,6078	0,5825	0,5592	0,5376	0,5177	0,4992
92	0,6358	0,6081	0,5828	0,5595	0,5379	0,5180	0,4995
93	0,6360	0,6084	0,5830	0,5597	0,5381	0,5182	0,4997
94	0,6362	0,6085	0,5832	0,5598	0,5383	0,5183	0,4998
95	0,6363	0,6086	0,5832	0,5599	0,5384	0,5184	0,4999
96	0,6363	0,6087	0,5833	0,5600	0,5384	0,5185	0,5000
97	0,6364	0,6087	0,5833	0,5600	0,5384	0,5185	0,5000
98	0,6364	0,6087	0,5833	0,5600	0,5385	0,5185	0,5000
99	0,6364	0,6087	0,5833	0,5600	0,5385	0,5185	0,5000

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Имитационное моделирование системы передачи данных с ненадежными ФК

#### В.1 Основные характеристики абонентского узла

Далее указаны исходные условия запуска модели при выполнении оценки надежности среды установления соединения:

- количество соседних узлов= 4;
- время работы модели= 10000с;
- узлы используют конкурентный доступ к среде установления соединения на основе Slotted Aloha;
- длительность слота канала= 0.8с.;
- период обновления отношений соседства= 120с.;
- окно выбора момента начала обновления отношений соседства= 60с.;
- количество каналов среды установления соединения= 8;
- битовая скорость передачи= 2400 бит/с.;
- мощность передатчика= 4Вт;
- уровень шума= -110дБ;
- чувствительность приемников= -115дБ;
- максимальное расстояние между узлами  $\leq 500$ км;
- окно выбора слота попытки передачи= 8 слотов;
- количество попыток передачи кадра= 2;
- длительность процедуры установления соединения= 1.6с.;
- длительность передачи кадра управления= 0.614с.;
- длина кадра управления= 26 бит;
- длина кодовой последовательности управляющего кадра= 1472 бита.

Далее указаны исходные условия запуска модели в ходе выполнения одного из серии экспериментов при оценке надежности сетевых узлов:

- количество соседних узлов= 4;
- время работы модели= 10000с;
- узлы используют конкурентный доступ к среде установления соединения на основе Slotted Aloha;
- длительность слота канала= 0.8с.;
- доступ к среде передачи данных – в асинхронный «точка-точка»;

- период широковещательного объявления узла= 44с.;
- размер окна выбора слота попытки передачи= 8 слотов;
- период обновления отношений соседства= (60, 120, 240) с.;
- период генерации требования передачи сообщения= (10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 180, 220) с.;
- время передачи кадра данных= 4.927с,
- время настройки приемопередатчиков на выбранный частотный канал= 0.667с.;
- время передачи кадра управления= 1.307с.;
- длительность кратчайшего межкадрового интервала= 0.2с.;
- максимальное значение счетчика попыток установления соединения= 2.

Параметры передающей среды имитационной модели:

- базовый уровень шума = -70дБ;
- несущая частота: 3.0015 МГц;
- порог чувствительности приемника: –60 дБ;
- пороговое значение принимаемого сигнала: 40 дБ;
- 
- максимальная дистанция распространения сигнала= 500000м;

Далее указаны исходные условия запуска модели в ходе выполнения одного из экспериментов:

- количество соседних узлов= 4;
- расстояние между соседними узлами=150км (212км);
- время работы модели= 10000с.;
- узлы используют конкурентный синхронный доступ к среде установления соединения;
- узлы используют асинхронных доступ к среде передачи данных по типу «точка-точка»;
- количество используемых каналов установления соединения= 8;
- количество используемых каналов передачи данных= 8;
- максимальное количество каналов передачи данных, составляющих интерфейс узла= 4;
- мощность передатчика = 2000мВт;
- пороговое значение допустимой ошибки элемента сигнала= 1e-03.

## **В.2 Численные результаты имитационного моделирования надежности физического канала**

Для каждой пары соседних узлов  $\{s, k\} \in N$  в течение периода  $T_{\text{оос}}^{s,k}$  формируются (обновляются) множества оценок качества физических каналов  $P_{\text{ош},j}\{p_{\text{ош},ij}\}$ , где  $j = 1, \dots, |E_{\text{yc}}|$ ;  $i = 1, 2, \dots$ ;  $p_{\text{ош},ij}$  – вероятность ошибки элемента сигнала за время приема дискретного сообщения (кадра) длительностью  $T_{\text{кадр.СУС}}$ .

Таблица В.2.1 Значения вероятности исправной работы физического канала (Риск), полученные на интервале моделирования  $t=10000$  с., при взаимодействии узлов  $n_0$  и  $n_1$  в первом канале установления соединения

Время (с.)	Отношение сигнал/шум (Z)	Вероятность ошибки элемента сигнала ( $p_{\text{ош}}$ )	Вероятность надежного приема дискретного сообщения (Рнпдс)	Вероятность исправного состояния канала (Риск)	Интенсивность отказов канала ( $\lambda_{e,\text{yc.1}}$ )	Интенсивность восстановления канала ( $\mu_{e,\text{yc.1}}$ )
101,4138	35,43385	0,000286	1	1	0,003355	0,03763
324,6138	35,84801	0,00026	1	0,880938	0,00452	0,026924
359,8138	35,15435	0,000305	0,541191	0,69981	0,009353	0,008483
549,4138	35,78167	0,000264	0,511313	0,433992	0,007001	0,004837
709,4138	35,09773	0,000309	0,364623	0,37849	0,012687	0,00326
740,6138	36,15974	0,000242	0,30576	0,341761	0,054752	0,004823
935,0138	14,61709	0,032306	0,060355	0,039101	0,004169	0,002484
1383,014	0	1	0,060355	0,518433	0,004306	0,004635
1415,014	35,68402	0,00027	1	0,604035	0,002387	0,034423
1511,814	36,47622	0,000225	1	0,845862	0,002502	0,061051
1575,814	36,23216	0,000238	1	0,977202	0,003147	0,685355
1831,014	36,00108	0,000251	1	1	0,003918	-
1927,814	34,94572	0,00032	1	1	0,002892	0,005989
2343,814	34,94572	0,00032	1	0,598657	0,004015	0,005989
2437,414	35,65195	0,000272	0,452546	0,536476	0,0077	0,008082
2503,814	36,32442	0,000233	0,420294	0,509159	0,003542	0,00307
2597,414	35,86475	0,000259	0,368347	0,489822	0,004024	0,003412
3045,414	0	1	0,368347	0,452372	0,004934	0,004076
3206,214	34,64408	0,000343	0,444066	0,396143	0,008482	0,004948
3365,414	35,01416	0,000315	0,415172	0,340411	0,01177	0,005902
3460,614	36,25046	0,000237	0,371707	0,32319	0,003468	0,003924
3908,614	0	1	0,371707	0,575043	0,003882	0,005253
4102,214	34,7079	0,000338	0,999936	0,809978	0,001846	0,027183
4487,014	36,12398	0,000244	1	1	0,002599	-
4647,814	35,29922	0,000295	0,999988	1	0,003943	-
4740,614	36,3431	0,000232	0,999937	1	0,003457	0,016348
4998,214	34,54388	0,000351	1	0,762546	0,005091	0,016348
5445,414	34,82518	0,000329	0,419689	0,583736	0,003831	0,005372
5702,214	18,56656	0,013534	0,493852	0,742162	0,005247	0,015103
5765,414	34,68226	0,00034	1	0,793111	0,003089	0,037543
6052,614	36,08851	0,000246	1	0,952784	0,003654	0,073743
6085,414	35,83133	0,000261	1	0,956271	0,00311	0,015425
6212,614	36,01843	0,00025	1	0,932377	0,003446	0,015774
6439,014	35,73257	0,000267	1	0,757975	0,005827	0,01825
6471,014	36,39966	0,000229	0,422518	0,724175	0,006723	0,005867
6758,214	36,1958	0,00024	0,371235	0,437242	0,007963	0,006187
7206,214	0	1	0,371235	0,530096	0,004211	0,00475
7335,814	35,81471	0,000262	1	0,6856	0,002285	0,024542
7684,614	35,65195	0,000272	1	1	0,002867	-
7718,214	35,76524	0,000265	1	1	0,002252	0,256928
7878,214	35,62011	0,000274	1	1	0,002436	0,256928
8132,614	35,55714	0,000278	1	0,984701	0,003992	0,256928

8196,614	34,50689	0,000354	1	0,965589	0,004619	0,120765
8357,414	36,01843	0,00025	1	0,9622	0,004581	0,136644
8422,214	35,93238	0,000255	1	0,980863	0,002618	0,806409
8740,614	35,98381	0,000252	0,999983	1	0,003141	-
8868,614	35,66795	0,000271	1	0,989234	0,004136	0,021629
9028,614	34,27967	0,000373	0,999999	0,719643	0,004171	0,003652
9031,814	35,54153	0,000279	0,453483	0,713635	0,008026	0,004367
9382,214	35,62011	0,000274	0,397117	0,349082	0,008175	0,004384
9511,814	12,08673	0,05504	0,517724	0,66026	0,004879	0,019003
9575,014	36,03584	0,000249	0,999997	0,864016	0,003584	0,111067
9639,814	34,75963	0,000334	0,999996	1	0,004457	2,442776
9799,814	34,40977	0,000362	0,999665	0,997441	0,006266	2,442776
9926,214	35,93238	0,000255	0,999665	0,998447	-	-

Таблица В.2.2 – Средние значения и СКО вероятности исправной работы физического канала, полученные на интервале моделирования  $t=10000$  с., при взаимодействии узлов  $n_0$  и  $n_1$  в первом канале установления соединения

	Отношение сигнал/шум (Z)	Вероятность ошибки элемента сигнала ( $p_{ош}$ )	Вероятность надежного приема дискретного сообщения (Рнпдс)	Вероятность исправного состояния канала (Риск)	Интенсивность отказов канала ( $\lambda_{е.у.с.1}$ )	Интенсивность восстановления канала ( $\mu_{е.у.с.1}$ )
Среднее значение параметра	31,8667	0,0748	0,7546	0,7417	0,0056	0,1651
Среднеквадратическое отклонение значения параметра	10,1864	0,2616	0,3125	0,251	0,0072	0,4996

### В.3 Численные результаты имитационного моделирования надежности среды установления соединения

Процедура обновления отношений соседства инициируется любым из узлов пары  $\{s, k\}$ , чей таймер ожидания истечет раньше. Для исключения одновременного истечения таймеров соседних узлов исходные значения задаются путем суммирования постоянной части и выбираемой случайным образом из заданного диапазона:

$$T_{00с} = T_{з.00с} + T_{о.з.00с} + T_{д.сус},$$

где  $T_{з.00с}$  – период подачи запроса обновления отношений соседства;  $T_{о.з.00с}$  – случайное время отсрочки запроса обновления отношений соседства;  $T_{д.сус}$  – случайное время доступа к среде установления соединения. В таблице В.3.1 показаны значения среднего времени обновления отношений соседства, полученные с помощью выражения (4.3.1.2) в ходе работы имитационной модели «Эстафета». При проведении имитационного моделирования были приняты базовые значения  $T_{з.00с} = 120с$ ,  $T_{о.з.00с} = 60с$ . В приложении В.1 приведены характеристики физического уровня имитационной модели системы передачи данных.

В таблице В.3.1 (приложение В.3) приведены статистические данные качества сигналов, принимаемых узлами  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2} \in E_{yc}$ , полученные за период измерения  $T_{exp} = 10^4$ с.

Таблица В.3.1 – Статистические данные качества сигналов, принимаемых узлами  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2}$ , полученные за период измерения  $t = 10^4$ с

Время приема кадра узлом n0 от узла n1 в канале $e_{yc.2}$	Вероятность ошибки элемента сигнала узла n1 определенная узлом n0	Время приема кадра узлом n1 от узла n0 в канале $e_{yc.2}$	Вероятность ошибки элемента сигнала узла n0 определенная узлом n1
107.013833679475	0.000245	297.413833679475	0.000247084
360.613833679475	0.000358	427.813833679475	0.000270439
394.213833679475	0.000345	715.013833679475	0.000254583
457.413833679475	0.000262	808.613833679475	0.000257994
714.213833679475	0.000292	971.013833679475	0.000233088
715.813833679475	0.000254	1000.613833679475	0.000273479
971.813833679475	0.000244	1480.613833679475	0.000314245
1130.213833679475	0.000276	1608.613833679475	0.000303276
1131.013833679475	0.000248	1738.213833679475	0.000260901
1387.013833679475	0.000296	1930.213833679475	0.000301306
1576.613833679475	0.000257	2280.613833679475	0.000332879
2281.413833679475	0.000358	2440.613833679475	0.000310664
2345.413833679475	0.000281	2539.013833679475	0.000289443
2539.813833679475	0.000282	2890.213833679475	0.000384713
2603.013833679475	0.000263	2955.813833679475	0.000261113
2889.413833679475	0.000252	3051.013833679475	0.000284407
2985.413833679475	0.000298	3275.813833679475	0.000346908
3179.813833679475	0.000222	3403.013833679475	0.000424839
3562.213833679475	0.000271	3435.013833679475	0.0128137
3627.013833679475	0.376381	3561.413833679475	0.000263642
3690.213833679475	0.00239	3945.413833679475	0.000246526
4073.413833679475	0.00235	4393.413833679475	0.000358716
4104.613833679475	0.00323	4554.213833679475	0.000247092
4171.813833679475	0.00336	4587.813833679475	0.000262816
4872.613833679475	0.003	4746.213833679475	0.000219783
5032.613833679475	0.00285	4906.213833679475	0.000266441
5099.813833679475	0.00278	5033.413833679475	0.000241039
5801.413833679475	0.00295	5098.213833679475	0.000463617
5930.213833679475	0.00243	5800.613833679475	0.000272881
5963.813833679475	0.00288	5803.813833679475	0.00023079
6153.413833679475	0.00264	5867.013833679475	0.000329778
6571.013833679475	0.00307	5928.613833679475	0.000257808
6696.613833679475	0.00308	6154.213833679475	0.000330606
6795.013833679475	0.00249	6571.813833679475	0.000250558
7209.413833679475	0.00313	6699.013833679475	0.000254704
7211.013833679475	0.00264	6857.413833679475	0.000251533
7243.013833679475	0.00266	7147.013833679475	0.000310665
7371.013833679475	0.00233	7242.213833679475	0.000341592
7465.413833679475	0.00359	7498.213833679475	0.000271237
7499.013833679475	0.00345	7787.013833679475	0.000385621
7531.013833679475	0.000179	7819.013833679475	0.00030631
7753.413833679475	0.000138	7819.813833679475	0.000378073
7818.213833679475	0.00016	8522.213833679475	0.000406534
7851.813833679475	0.000132	8555.813833679475	0.00028152
8170.213833679475	0.000184	8651.813833679475	0.000247649
8203.813833679475	0.000105	9323.013833679475	0.000336498
8267.013833679475	0.000116	9386.213833679475	0.000345618

8392.613833679475	0.000135	9481.413833679475	0.000334318
8426.213833679475	0.000122	9515.813833679475	0.000265354
8555.013833679475	0.000123	9963.013833679475	0.00027683
8587.813833679475	0.000131	297.413833679475	0.000247084
8746.213833679475	0.000118	427.813833679475	0.000270439
8842.213833679475	0.000159	715.013833679475	0.000254583
8905.413833679475	0.00014	808.613833679475	0.000257994
9033.413833679475	0.000174	971.013833679475	0.000233088
9482.213833679475	0.000115	1000.613833679475	0.000273479
9611.813833679475	0.00014	1480.613833679475	0.000314245
9675.813833679475	0.000149	1608.613833679475	0.000303276
9739.813833679475	0.000128	1738.213833679475	0.000260901
9770.213833679475	0.000165	1930.213833679475	0.000301306

В таблицах В.3.2, В.3.3 приведены значения параметров надежности взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2} \in E_{yc}$ , полученные за период измерения  $T_{exp} = 10^4$ с, принятые в качестве исходных данных для моделирования надежности среды установления соединения.

Таблица В.3.2 Значения параметров качества взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2}$ , полученные за период измерения  $t = 10^4$ с

№	Отношение сигнал/помеха на входе узла n0 (дБ)	Отношение сигнал/помеха на входе узла n1 (дБ)	Вероятность надежного приема дискретного сообщения узлом n0	Вероятность надежного приема дискретного сообщения узлом n1	Вероятность исправного состояния канала на входе узла n0	Вероятность исправного состояния канала на входе узла n1
1	36,10621	36,06941	0,916368	1	0,919039	0,995996
2	34,45806	35,67696	0,916368	1	0,926395	0,998518
3	34,61881	35,93949	0,995911	1	0,96907	0,992283
4	35,81471	35,88166	1	1	1	1
5	35,34363	36,32278	1	0,998058	0,998609	0,997438
6	35,94946	35,62838	1	0,999939	0,998184	0,990609
7	36,12398	35,02459	1	0,999939	0,983154	0,999417
8	35,58851	35,17898	0,999999	0,999934	1	1
9	36,05333	35,83298	0,999734	0,999971	1	1
10	35,28451	35,2073	0,999734	0,999998	1	0,9788
11	35,89844	34,77424	0,934241	0,999998	0,913348	0,971902
12	34,45806	35,07439	0,934241	1	0,578015	0,996394
13	35,5105	35,38185	3,46E-37	0,922395	0,61258	1
14	35,49506	34,14529	1	0,922395	0,779715	0,96114
15	35,79816	35,82916	1	0,994686	0,844304	0,932762
16	35,98381	35,45813	1	0,990371	1	0,884545
17	35,25525	34,59484	0,988034	0,990371	1	0,768771
18	36,53454	33,71406	0,999823	0,392633	1	0,725699
19	35,66795	18,81051	0,999823	0,421195	0,506987	0,719327
20	28,2512	35,78756	0,240735	1	0,406295	0,714643
21	26,19521	36,07923	0	1	0,313163	0,873027
22	26,26886	34,44938	0	0,917067	0	1
23	24,87983	36,06927	1,71E-114	1	0	1
24	24,70732	35,8012	1,05E-59	0,999998	0	1
25	25,20265	36,57815	1,05E-59	0,999919	0,061583	0,955583
26	25,42673	35,74167	0	1	0	0,880126
27	25,53534	36,17703	3,30E-189	0,830764	0	0,827807
28	25,27608	33,33438	3,30E-189	0,73975	0	0,807473
29	26,12278	35,6379	9,31E-44	0,73975	0	0,910302

30	25,38099	36,36583	1,67E-59	0,986725	0,019035	0,911361
31	25,76097	34,81492	7,22E-31	0,993097	0,106863	0,931352
32	25,10187	35,8848	7,22E-31	0,984756	0,019278	0,948714
33	25,08766	34,80402	5,01E-16	0,984756	0	0,988832
34	26,01632	36,00874	3,28E-14	0,976843	0	0,991252
35	25,01728	35,93743	3,28E-14	1	0,024825	0,990325
36	25,76097	35,99186	2,51E-11	0,99706	0,026873	0,9936
37	25,72802	35,07438	1,93E-08	0,99706	0,070276	0,998889
38	26,30616	34,66196	4,33E-08	0,984316	0,281238	0,995077
39	24,41776	35,66415	0,437673	0,984316	0,461299	0,967945
40	24,59174	34,13504	0,519854	0,892215	0,526935	0,945536
41	37,46991	35,13573	0,999996	0,94128	0,58906	0,946558
42	38,60001	34,22096	1	0,999598	0,957045	0,946602
43	37,95741	33,9055	1	0,999598	1	1
44	38,79311	35,50246	0,999777	0,994789	1	0,995127
45	37,35022	36,05948	0,999777	0,963437	1	0,955333
46	39,78719	34,72725	1	0,963437	1	0,970019
47	39,35441	34,61103	1	0,99612	1	0,985814
48	38,69549	34,7555	1	0,999092	0,967233	0,9947
49	39,13534	35,75944	1	1	0,960293	0,99873
50	39,09988	35,57546	1	1	0,962806	0,99693
51	38,82615	-	1	-	0,96986	-
52	39,28015	-	0,999993	-	1	-
53	37,98465	-	1	-	1	-
54	38,5375	-	0,999992	-	1	-
55	37,593	-	0,998855	-	0,969161	-
56	39,39202	-	0,998855	-	0,979572	-
57	38,5375	-	1	-	1	-
58	38,26684	-	1	-	0,990336	-
59	38,92679	-	0,999999	-	0,964065	-
60	37,82373	-	0,999999	-	1	-

Продолжение таблицы В.3.2 Значения параметров качества взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc,2}$ , полученные за период измерения  $t = 10^4 c$

	Интенсивность отказов канала на входе узла n0	Интенсивность отказов канала на входе узла n1	Интенсивность восстановления канала на входе узла n0	Интенсивность восстановления канала на входе узла n1
1	0,000523	1,35E-05	0,006121	0,003349
2	0,00029	1,91E-05	0,003653	0,005556
3	0,000309	2,69E-05	0,016184	0,003455
4	2,71E-06	7,89E-06	0,009856	0,008413
5	5,42E-06	0,000111	0,003889	0,013897
6	0,0006	0,000159	0,313853	0,017774
7	6,58E-05	1,21E-06	0,00384	0,002082
8	0	0	0,420073	0,007764
9	0	5,52E-05	0,626953	0,006407
10	0	9,53E-05	0,003906	0,003936
11	0,000528	8,02E-05	0,002819	0,002774
12	0,000599	1,13E-05	0,00082	0,008195
13	0,003593	5,53E-05	0,006791	0,00645
14	0,001798	0,000111	0,008685	0,002737
15	0,001232	0,001089	0,008425	0,008977
16	0	0,001121	0,003492	0,006356
17	0	0,001029	0,00778	0,00342
18	0,000645	0,004395	0,003235	0,011279
19	0,001289	0,003786	0,001326	0,010135
20	0,007546	0,001294	0,003742	0,003964
21	0,006739	0,000331	0,002478	0,002274

22	0,00261	0	0	0,002232
23	0,01609	9,35E-05	2,93E-05	0,014005
24	0,00811	0,000343	4,39E-05	0,013765
25	0,001339	0,000515	8,79E-05	0,005767
26	0,010565	0,001051	0	0,006004
27	0,008153	0,001484	0	0,006755
28	0,001425	0,001549	0	0,006878
29	0,01389	0,000128	0,000377	0,001296
30	0,012085	0,007417	0,000392	0,07983
31	0,00353	0,000656	0,000305	0,011507
32	0,002348	0,000441	4,62E-05	0,009892
33	0,009062	4,95E-05	0	0,004383
34	0,006258	2,09E-05	3,00E-05	0,002374
35	0,002353	5,82E-05	5,99E-05	0,007029
36	0,162145	2,21E-05	0,006519	0,004861
37	0,013459	3,84E-06	0,003093	0,003449
38	0,008467	8,85E-05	0,007589	0,007117
39	0,008205	0,000125	0,01082	0,003781
40	0,009038	0,000189	0,012798	0,003274
41	0,006518	0,022806	0,011356	0,404752
42	9,66E-05	0,033374	0,009868	0,592338
43	0	0	0,016112	0,001424
44	0	0,000218	0,016451	0,013671
45	0	0,000255	0,003141	0,005698
46	0,000361	4,47E-05	0,020466	0,001445
47	0,000433	0,000106	0,014895	0,01836
48	0,000577	4,63E-05	0,014585	0,019741
49	0,000597	3,69E-05	0,017984	0,029033
50	0,000403	-	0,014452	-
51	0,000306	-	0,015433	-
52	0	-	0,008365	-
53	8,03E-05	-	0,01127	-
54	9,55E-05	-	0,008526	-
55	0,000143	-	0,004877	-
56	4,55E-05	-	0,002183	-
57	0,000237	-	0,012751	-
58	0,000356	-	0,015269	-
59	0,000561	-	0,015064	-
60	-	-	-	-

Таблица В.3.3 Средние значения параметров качества взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc,2}$ , полученные за период измерения  $t = 10^4$ с

	Вероятность надежного приема дискретного сообщения узлом n0	Вероятность надежного приема дискретного сообщения узлом n1	Вероятность исправного состояния канала на входе узла n0	Вероятность исправного состояния канала на входе узла n1
Максимальное значение параметра	1	1	1	1
Минимальное значение параметра	0	0,3926	0	0,7146
Среднее значение параметра	0,648	0,95	0,6443	0,9467
Среднеквадратическое отклонение значения параметра	0,4642	0,1263	0,4213	0,0787

Продолжение таблицы В.3.3 Средние значения параметров качества взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2}$ , полученные за период измерения  $t = 10^4$ с

	Интенсивность отказов канала на входе узла n0	Интенсивность отказов канала на входе узла n1	Интенсивность восстановления канала на входе узла n0	Интенсивность восстановления канала на входе узла n1
Максимальное значение параметра	0,1621	0,0334	0,627	0,5923
Минимальное значение параметра	0	0	0	0,0013
Среднее значение параметра	0,0067	0,0017	0,0328	0,029
Среднеквадратическое отклонение значения параметра	0,02287	0,0058	0,1123	0,1004

В результате моделирования каждым узлом для каждого отношения соседства получены значения коэффициента готовности  $F_{CUC}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{CUC}$  и восстановлений  $\mu_{CUC}$  среды установления соединения каждого канала  $e_{yc.i} \in E_{yc}$ . Численные значения коэффициента готовности, интенсивности отказов и восстановлений  $CUC_2$  узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2} \in E_{yc}$ , полученные за период измерения  $T_{exp} = 10^4$ с. Для каждого периода  $[t_i, t_i + T_{OOC}]$  узлами  $\{n0, n1\}$  определены интенсивности отказов  $\lambda_{CUC.2}$  и восстановлений  $\mu_{CUC.2}$   $CUC_2$ . Полученные численные результаты приведены в таблице В.3.4.

Таблица В.3.4 – Коэффициент готовности, интенсивности отказов и восстановлений  $CUC$  узлов  $\{n0, n1\}$  в канале  $e_{yc.2}$ , полученные за период измерения  $t = 10^4$ с.

Время выполнения оценки надежности CUC	Коэффициент готовности $F_{CUC.2}$	Интенсивность отказов $\lambda_{CUC.2}$	Интенсивность восстановления $\mu_{CUC.2}$
394,2138	0,984502	0,000129	0,008169
715,8138	0,9926	0,000393	0,052671
1130,214	0,991984	8,02E-05	0,009928
1576,614	0,760623	0,000591	0,001878
2345,414	0,722727	0,002784	0,007256
2603,014	0,902218	0,000649	0,005599
2985,414	0,908002	0,000433	0,004273
3562,214	0,432333	0,002369	0,001804
3627,014	0,195919	0,00879	0,002142
4104,614	0,005473	0,008844	4,87E-05
5032,614	0	0,009359	0
5801,414	0	0,001742	0
5930,214	0,029293	0,011103	0,000335
6571,014	0,015996	0,003187	5,18E-05
6696,614	0,004679	0,008032	3,78E-05
7211,014	0,126084	0,04809	0,006938
7499,014	0,680301	0,005258	0,011188
7818,214	0,998889	3,84E-06	0,003449
8203,814	0,953155	0,000599	0,012185
8555,014	0,928332	0,000425	0,005503
8842,214	0,934649	0,018833	0,269347
9482,214	0,955788	0,000218	0,004716

9611,814	-	-	-
----------	---	---	---

Таблица В.3.5 Показатели коэффициента готовности СУС ( $F_{СУС.2}$ ) узлов  $\{n0, n1\}$  в физическом канале  $e_{yc,2}$ , полученные за период измерения  $t = 10^4$ с.

Максимальное значение	0,998889
Минимальное значение	0
Среднее значение	0,569252
Среднеквадратическое отклонение	0,425898

#### В.4 Численные результаты имитационного моделирования надежности трассы установления соединения

Таблица В.4.1 Коэффициенты готовности сред установления соединения  $\{F_{СУС.i}\}$ , полученные в ходе имитационного моделирования взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в течение  $T_{exp} = 10^4$  секунд, где  $i = (1, \dots, 8)$  – номер канала установления соединения;  $t_{00c}$  – время обновления отношений соседства

$t_{00c}$	$F_{СУС.1}$	$F_{СУС.2}$	$F_{СУС.3}$	$F_{СУС.4}$	$F_{СУС.5}$	$F_{СУС.6}$	$F_{СУС.7}$	$F_{СУС.8}$
212,2948	0	0,689420576	0	0,960672653	0,992889171	0	0,322084596	0,972062432
364,2948	0	0,384008062	0,996223575	0,96064452	0,992889171	0	0,322084596	0,602260371
501,0948	0	0,384008062	0,994878421	0,96064452	0,967371837	0	0,517392443	0,536115787
582,6948	0,914888218	0,368346593	0,994878421	0,96064452	0,967371837	0,3186192	0,536444749	0,508905756
723,4948	0,974848033	0,501404311	0,985206822	0,939300802	0,958720332	0,318634509	0,980549038	0,508905756
887,4948	0,976271632	0,513823131	0,986116275	0,921263395	0,950986137	0,318634509	0,980954128	0,510250507
933,8948	0,937799839	0,513823131	0,986116275	0,921263395	0,947402479	0,318634509	0,747886626	0,346306504
1084,295	0,937799839	0,516877237	0,988571909	0,916937061	0,945871581	0,371345315	0,725163006	0,787851909
1092,295	0,937923475	0,516877237	0,988571909	0,916937061	0,945871581	0,371345315	0,725163006	0,793409109
1254,695	0,939172552	0,517038453	0,937849314	0,946888248	0,923061203	0,937985528	0,713816663	0,793409109
1418,695	0,891859853	0,573388382	0,937815283	0,947418921	0,920293587	0,478492906	0,713816663	0,932248207
1428,295	0,891859853	0,573388382	0,937815283	0,945284519	0,916910735	0,478492906	0,713816663	0,932248207
1515,495	0,891662246	0,89155658	0,938006689	0,945284519	0,944812106	0,478492906	0,713816663	0,952269461
1580,295	0,891662246	0,910170545	0,925870013	0,945284519	0,944812106	0,628654323	0,713816663	0,941600012
1722,695	0,945779319	0,910170545	0,905791995	0,92507771	0,957517976	0,721853955	0,713816663	0,941600012
1889,095	0,945980957	0,760373431	0,912436863	0,903253681	0,99313716	0,721853955	0,713935111	0,917773588
2040,295	0,957514596	0,748212692	0,914852751	0,903253681	0,984070697	0,507771922	0,713935111	0,918160097
2138,695	0,957096124	0,413742218	0,914852751	0,903253681	0,984070697	0,495280993	0,638826054	0,918160097
2285,095	0,915691988	0,56985721	0,916666102	0,936018842	0,894764639	0,495280993	0,653705652	0,918160097
2304,295	0,915691988	0,56985721	0,916666102	0,936018842	0,894764639	0,495280993	0,637544602	0,9043033
2444,295	0,915691988	0,638975433	0,854722749	0,509030107	0,843769585	0,504608079	0,609300799	0,954546986
2543,495	0,915691988	0,642221789	0,810320466	0,510442367	0,846657458	0,830495938	0,848280651	0,98780784
2709,895	0,938705577	0,643967535	0,769329948	0,816059627	0,774807463	0,870738104	0,941923207	0,98780784
2893,895	0,957869249	0,643967535	0,690410975	0,783269212	0,590983725	0,961961571	0,941923207	0,964116084
2944,295	0,957869249	0,643967535	0,690410975	0,783269212	0,590983725	0,965826944	0,956318827	0,953772467
3077,095	0,98811332	0,643967535	0,322480846	0,912766024	0,591018103	0,98811669	0,956318827	0,929668711
3395,495	0,993765357	0,63431382	0,281150205	0,933769654	0,774595295	0,6737071	0,966925381	0,917891365
3556,295	0,992364024	0,855533656	0,40569345	0,918847012	0,837536486	0,671983701	0,964102451	0,915537891
3565,895	0,992364024	0,855533656	0,240591095	0,918847012	0,837536486	0,671983701	0,964102451	0,915537891
3700,295	0,851103764	0,855533656	0,018182899	0,870095454	0,944392077	0,567704421	0,964102451	0,918929061
3731,495	0,851103764	0,855533656	0,018182899	0,771107638	0,944392077	0,567704421	0,964102451	0,918929061
3893,895	0,850974858	0,855533656	0,018182899	0,729226416	0,836339517	0,647715812	0,964102451	0,918929061
3906,695	0,850974858	0,855533656	0,018182899	0,729226416	0,836339517	0,658150838	0,964102451	0,940126584
3923,495	0,850974858	0,855533656	0,018182899	0,743799462	0,836339517	0,658150838	0,964102451	0,940126584
4056,295	0,844804813	0,90688876	0,02065564	0,714693187	0,797151673	0,684205955	0,968398471	0,953531061
4213,895	0,844804813	0,908831225	0,047604682	0,686773429	0,65871663	0,915671088	0,998240571	0,946942607

4347,495	0,844804813	0,908831225	0,047604682	0,691371797	0,628633924	0,942737805	0,99980001	0,948024474
4491,495	0,208611724	0,486858129	0,049465145	0,701795679	0,62112055	0,942218001	0,99980001	0,948024474
4497,895	0,208611724	0,486858129	0,049465145	0,721672008	0,62112055	0,942218001	0,99980001	0,948024474
4651,495	0,265326655	0,392482027	0,042138298	0,589507279	0,591955163	0,942218001	0,971953794	0,941585487
4800,295	0,238566731	0,28840983	0,041334783	0,621053633	0,591955163	0,997398934	0,99152207	0,944056258
4805,895	0,196094536	0,28840983	0,041334783	0,621053633	0,591955163	0,997398934	0,99152207	0,944056258
4954,695	0,196094536	0,28840983	0,047940351	0,59512219	0,638747004	0,946886976	0,997685706	0,95129756
5037,095	0,196094536	0,270109135	0,000314443	0,59512219	0,638747004	0,946886976	0,997685706	0,967471097
5205,095	0,209031918	0,270109135	0	0,693786777	0,735236517	0,947357164	0,788740863	0,9679524
5218,695	0,209031918	0,270109135	0	0,693786777	0,735236517	0,929236256	0,788410567	0,981570572
5396,295	0,199385117	0,270109135	0	0,726956144	0,536306731	0,929236256	0,660509128	0,983670979
5473,095	0,558020825	0,250861199	0	0,726956144	0,531284297	0,929236256	0,660509128	0,972778583
5637,895	0,616199863	0,25125829	0	0,969095062	0,57692388	0,96160845	0,63718288	0,972778583
5805,095	0,616199863	0,898915123	0	0,982277842	0,57692388	0,998624231	0,35861145	0,972778583
5957,895	0,856228089	0,925620972	0,014239472	0,981866251	0,57692388	0,998315557	0,42685899	0,973465606
6113,095	0,856228089	0,980078243	0,017101587	0,981866251	0,347626819	0,995743035	0,346440656	0,985280399
7089,895	0,997170842	0,942922826	0,184682617	0,971198447	0,739235198	0,997928206	0,355234759	0,943154068
7246,695	0,997170842	0,95555194	0,677581027	0,974459529	0,730562097	0,994613834	0,355234759	0,942062571
7255,495	0,997170842	0,95555194	0,677581027	0,974459529	0,714013695	0,994613834	0,355234759	0,942062571
7339,495	0,997170842	0,935351192	0,677581027	0,974459529	0,71375579	0,997072964	0,355234759	0,942062571
7502,695	0,997170842	0,935351192	0,904515007	0,974459529	0,704340266	0,987946075	0,210318443	0,942416528
7643,495	0,997676326	0,935351192	0,918425084	0,972770163	0,704258906	0,987555938	0,196555161	0,943642561
7824,295	0,993760763	0,953214488	0,999759465	0,98951189	0,715022294	0,663784088	0,196555161	0,983420118
7856,295	0,993760763	0,953214488	0,999759465	0,98951189	0,715022294	0,663784088	0,196555161	0,983420118
7882,695	0,993760763	0,964305124	0,999759465	0,98951189	0,715022294	0,663784088	0,196555161	0,983420118
8037,895	0,991636689	0,962213558	0,999759465	0,985726753	0,715070221	0,622692134	0,366407495	0,98374863
8361,095	0,985137008	0,98901451	0,986287992	0,970676634	0,684309129	0,607009509	0,92728437	0,983882051
8559,495	0,802463042	0,980316758	0,972576197	0,98589546	0,910117373	0,958347035	0,933027712	0,983882051
8726,695	0,802463042	0,980316758	0,968242413	0,987130812	0,822829232	0,983520137	0,931292721	0,997170138
8872,295	0,793889111	0,535827329	0,966256195	0,987130812	0,815677219	0,978890863	0,927476023	0,997547133
8997,895	0,996830939	0,535827329	0,964542485	0,978663769	0,815677219	0,983439566	0,927476023	0,997547133
9141,895	0,996830939	0,408638346	0,963102905	0,988691712	0,895221139	0,98166011	0,927476023	0,997547133
9208,295	0,996830939	0,408638346	0,963102905	0,94267479	0,900814823	0,978431964	0,949740772	0,997547133
9346,695	0,996716649	0,408638346	0,96890661	0,929618902	0,900814823	0,978431964	0,999797338	0,954077873
9371,495	0,996716649	0,408638346	0,96890661	0,929618902	0,90644952	0,984595625	0,999797338	0,954077873
9396,295	0,996088288	0,395397215	0,978243839	0,928908598	0,905683635	0,984595625	0,999797338	0,954077873
9569,895	0,996088288	0,823614135	0,987002725	0,928908598	0,954546672	0,984595625	0,999797338	0,338917183
9578,695	0,996088288	0,922925965	0,987002725	0,928908598	0,954546672	0,984595625	0,999797338	0,338917183

Таблица В.4.2 Статистические данные коэффициентов готовности сред установления соединения, полученные в ходе имитационного моделирования взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в течение  $T_{exp} = 10^4$  секунд

	$F_{CVC.1}$	$F_{CVC.2}$	$F_{CVC.3}$	$F_{CVC.4}$	$F_{CVC.5}$	$F_{CVC.6}$	$F_{CVC.7}$	$F_{CVC.8}$
Максимальное значение параметра	0,0000	0,2509	0,0000	0,5090	0,3476	0,0000	0,1966	0,3389
Минимальное значение параметра	0,9977	0,9890	0,9998	0,9895	0,9931	0,9986	0,9998	0,9975
Среднее значение параметра	0,7866	0,6614	0,5861	0,8676	0,7938	0,7514	0,7481	0,8944
Среднеквадратическое отклонение параметра	0,3049	0,2463	0,4316	0,1339	0,1505	0,2701	0,2628	0,1603
Медианное значение параметра	0,9157	0,6440	0,8796	0,9289	0,8296	0,9225	0,8185	0,9441

В результате имитационного моделирования каждым узлом для каждого отношения соседства получены значения коэффициентов готовностей  $F_{TUC}$ , интенсивностей отказов  $\lambda_{CVC}$  и восстановлений  $\mu_{CVC}$  трасс установления соединения. Численные результаты моделирования: значения коэффициента готовности  $\{F_{TUC,i}\}$ , интенсивности отказов  $\{\lambda_{TUC,i}\}$  и восстановлений

$\{\mu_{Tyc.i}\}$  полученные в ходе взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  приведены в таблицах В.4.4, В.4.5, В.4.6.

Таблица В.4.4 Коэффициенты готовности трассы установления соединения при различных значениях допустимого количества повторных попыток  $r = 1, \dots, 8$ , полученные в ходе имитационного моделирования взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в течение  $T_{exp} = 10^4$  секунд;  $t_{00c}$  – время обновления отношений соседства

$t_{00c}$	Коэффициенты готовности трассы установления соединения ( $F_{Tyc}$ )							
	$r = 1$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 6$	$r = 7$	$r = 8$
212,2948	0,492141179	0,656134207	0,738090217	0,787231443	0,819965301	0	0	0
364,2948	0,532263787	0,708701417	0,796188626	0,848102438	0,882236692	0,906218535	0	0
501,0948	0,545051384	0,724773818	0,813187706	0,865104107	0,898798705	0,922108016	0	0
582,6948	0,696262412	0,883000244	0,951438588	0,979255035	0,991031378	0,996102775	0,99830276	0,99926
723,4948	0,7709462	0,936282623	0,981420818	0,994510291	0,998371623	0,999516431	0,999856349	0,999957
887,4948	0,769787464	0,935587312	0,98110081	0,994379776	0,998322037	0,99949844	0,999850026	0,999955
933,8948	0,714904095	0,897913424	0,960881546	0,984639612	0,99391174	0,997577949	0,999035045	0,999615
1084,295	0,773802232	0,937978866	0,982192834	0,994821567	0,998488529	0,999558362	0,999870917	0,999962
1092,295	0,774512337	0,938396736	0,982381125	0,994896706	0,998516456	0,999568275	0,999874326	0,999963
1254,695	0,838652634	0,969893135	0,994241133	0,998893285	0,999787126	0,999959047	0,999992121	0,999998
1418,695	0,799416725	0,952082853	0,988119846	0,997027986	0,999254842	0,999813066	0,999953098	0,999988
1428,295	0,798727068	0,951729069	0,987982288	0,996980774	0,999239757	0,999808462	0,999951736	0,999988
1515,495	0,844487646	0,972159688	0,994899358	0,999061598	0,999827223	0,999968184	0,999994141	0,999999
1580,295	0,862733804	0,978626899	0,996610934	0,99946107	0,99991426	0,999986358	0,99999783	1
1722,695	0,877701022	0,983244379	0,997670708	0,999675541	0,999954792	0,999993701	0,999999122	1
1889,095	0,858593093	0,977240879	0,99626566	0,999385347	0,999898779	0,99998333	0,999997254	1
2040,295	0,830971443	0,966760612	0,993284157	0,998635789	0,999722582	0,999943573	0,999988522	0,999998
2138,695	0,778160327	0,940519173	0,983325817	0,995268976	0,998653086	0,999616166	0,999890588	0,999969
2285,095	0,78751819	0,945778402	0,985581306	0,99612474	0,998955501	0,999718261	0,999923989	0,999979
2304,295	0,78376596	0,943701555	0,984705322	0,995798065	0,998842066	0,999680638	0,999911899	0,999976
2444,295	0,728830716	0,908354778	0,967026722	0,987880619	0,995511096	0,99833264	0,999380025	0,999769
2543,495	0,798989812	0,951864021	0,98803483	0,996998832	0,999245534	0,999810227	0,999952259	0,999988
2709,895	0,842917412	0,971559294	0,994727851	0,999018469	0,999817119	0,99996592	0,999993649	0,999999
2893,895	0,816812695	0,960537675	0,991227389	0,998036422	0,99955982	0,99990129	0,999977863	0,999995
2944,295	0,817802367	0,960991725	0,991384249	0,99808418	0,999573358	0,999904958	0,999978826	0,999995
3077,095	0,791556257	0,947965831	0,986482847	0,996453098	0,999066851	0,999754331	0,999935311	0,999983
3395,495	0,772014772	0,936920186	0,981712439	0,994628473	0,998416236	0,999532514	0,999861965	0,999959
3556,295	0,820199834	0,962079718	0,991755834	0,998196015	0,999604696	0,999913351	0,999981006	0,999996
3565,895	0,799562039	0,952157216	0,988148685	0,997037857	0,999257987	0,999814023	0,999953381	0,999988
3700,295	0,748755473	0,922249756	0,974574277	0,991540584	0,997169482	0,999051122	0,999681706	0,999893
3731,495	0,736381996	0,913765377	0,970053286	0,989393064	0,996217178	0,998647616	0,999516093	0,999827
3893,895	0,727625584	0,907474954	0,966524242	0,987623997	0,995388615	0,99827678	0,999355357	0,999759
3906,695	0,731579652	0,91034486	0,968152682	0,988450016	0,995780134	0,998454103	0,999433124	0,999792
3923,495	0,733401283	0,911650737	0,96888349	0,988815348	0,99595073	0,998530213	0,999466003	0,999806
4056,295	0,736291195	0,913701365	0,970018124	0,989375827	0,996209289	0,998644166	0,999514632	0,999826
4213,895	0,750948131	0,923703882	0,975320871	0,991881617	0,997314769	0,999110236	0,999704997	0,999902
4347,495	0,751476091	0,924051798	0,975498256	0,991962054	0,997348784	0,999123973	0,999710369	0,999904
4491,495	0,619736714	0,810816186	0,895992314	0,940010491	0,964497922	0,978680747	0,987087662	0,992139
4497,895	0,622221255	0,813427005	0,898249102	0,941816831	0,965879681	0,979704449	0,987827643	0,992664
4651,495	0,592145838	0,780689489	0,86876807	0,91710387	0,945987313	0,964131893	0,975890632	0,983665
4800,295	0,589287175	0,777452228	0,865719828	0,914420613	0,943711498	0,962249839	0,974363939	0,982446
4805,895	0,583978151	0,771384128	0,859945561	0,909277907	0,939293668	0,958545995	0,97131556	0,979975
4954,695	0,582773019	0,769996647	0,858614371	0,908081478	0,938255657	0,957666477	0,970583549	0,979374
5037,095	0,576553886	0,762778168	0,851624833	0,901735095	0,932687916	0,952891969	0,966558828	0,976028
5205,095	0,576526847	0,762746573	0,851594007	0,90170687	0,932662928	0,952870332	0,966540401	0
5218,695	0,575922718	0,762040161	0,850904281	0,901074825	0,932102862	0,952384893	0,966126539	0

5396,295	0,538271686	0,716296681	0,804272225	0,856241452	0,890221627	0,913936721	0,931250525	0
5473,095	0,578705804	0,765286874	0,854066011	0,903963767	0,934654757	0,954589302	0,967999202	0
5637,895	0,623130876	0,814378546	0,899067348	0,942467986	0,966374681	0,980068763	0,98808918	0
5805,095	0,675541372	0,865174936	0,939182574	0,971618764	0,986551971	0,99358244	0,996927154	0
5957,895	0,719189852	0,90119051	0,962852659	0,98570306	0,9944487	0,997837164	0,999156226	0,999671
6113,095	0,688795635	0,876727649	0,947242737	0,976718709	0,989590785	0,995319033	0,997889558	0,999047
7089,895	0,76644087	0,933556051	0,980154226	0,99398871	0,998171516	0,999443113	0,999830327	0,999948
7246,695	0,828404575	0,965675812	0,992940294	0,99853979	0,999697624	0,99993737	0,999987027	0,999997
7255,495	0,826336025	0,964787688	0,992654091	0,998458553	0,999676152	0,999931944	0,999985698	0,999997
7339,495	0,824086084	0,963807538	0,99233339	0,998366118	0,999651344	0,99992558	0,999984114	0,999997
7502,695	0,832064735	0,96721686	0,993426885	0,998675109	0,999732669	0,999946048	0,999989111	0,999998
7643,495	0,832029417	0,967202175	0,993422308	0,998673853	0,999732348	0,999945969	0,999989092	0,999998
7824,295	0,811878533	0,958230835	0,990414384	0,997783826	0,999486751	0,999881089	0,999972448	0,999994
7856,295	0,811878533	0,958230835	0,990414384	0,997783826	0,999486751	0,999881089	0,999972448	0,999994
7882,695	0,813264863	0,958886243	0,990648084	0,997857292	0,999508251	0,999887101	0,999974078	0,999994
8037,895	0,828406868	0,965676789	0,992940607	0,998539878	0,999697647	0,999937376	0,999987028	0,999997
8361,095	0,89170015	0,9870174	0,998425704	0,999808833	0,999976783	0,99999718	0,999999658	1
8559,495	0,940828204	0,996292288	0,999766864	0,999985338	0,999999078	0,999999942	0,999999996	1
8726,695	0,934120657	0,995375312	0,999673948	0,999977006	0,999998378	0,999999886	0,999999992	1
8872,295	0,875336836	0,982555514	0,997521759	0,99964718	0,999949755	0,999992844	0,999998981	1
8997,895	0,900000558	0,989011117	0,99878051	0,99986452	0,999984947	0,999998327	0,999999814	1
9141,895	0,894896038	0,987806248	0,998569913	0,999832067	0,999980277	0,999997684	0,999999728	1
9208,295	0,892222709	0,98714821	0,998449956	0,999812795	0,999977387	0,999997268	0,99999967	1
9346,695	0,892125313	0,987123884	0,998445456	0,999812062	0,999977275	0,999997252	0,999999668	1
9371,495	0,893600108	0,987489586	0,998512616	0,99982293	0,999978917	0,99999749	0,999999701	1
9396,295	0,892849051	0,987304058	0,998478676	0,999817459	0,999978094	0,999997371	0,999999684	1
9569,895	0,876683821	0,982949839	0,997607427	0,999663569	0,999952679	0,999993344	0,999999064	1
9578,695	0,889097799	0,986355294	0,99830091	0,999788108	0,99997357	0,999996703	0,999999589	1

Таблица В.4.5 Статистические данные коэффициента готовности трассы установления соединения при различных значениях допустимого количества повторных попыток  $r = 1, \dots, 8$ , полученные в ходе имитационного моделирования взаимодействия узлов  $\{n0, n1\}$  в течение  $T_{exp} = 10^4$  секунд

	Коэффициенты готовности трассы установления соединения ( $F_{Tyc}$ )							
	$r = 1$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 6$	$r = 7$	$r = 8$
Максимальное значение параметра	0,4921	0,6561	0,7381	0,7872	0,8200	0,0000	0,0000	0,0000
Минимальное значение параметра	0,9408	0,9963	0,9998	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Среднее значение параметра	0,7612	0,9120	0,9573	0,9750	0,9836	0,9770	0,9546	0,8768
Среднеквадратическое отклонение параметра	0,1112	0,0845	0,0604	0,0444	0,0340	0,1170	0,1979	0,3285
Медианное значение параметра	0,7856	0,9447	0,9851	0,9960	0,9989	0,9997	0,9999	1,0000

### В.5 Численные результаты имитационного моделирования надежности узла следующего перехода

При выполнении имитационного моделирования надежности узла следующего перехода были приняты следующие исходные условия:

- количество проведенных экспериментов: 11;
- длительность каждого эксперимента (с.):  $10^4$ ;
- период отправки кадров Hello (с.): 44;
- период генерации запросов передачи данных (время в секундах): {220, 180, 100, 80, 60, 40, 30, 20, 10, 10, 10} с. в экспериментах {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11} соответственно;

- период обновления отношений соседства (время в секундах): {240, 120, 120, 120, 120, 120, 120, 120, 60, 60} с. при длительности конкурентного окна 60 с. в экспериментах {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11} соответственно;
- длительность передачи кадра данных (время в секундах): 4,927 с.;
- мощность сигнала (Вт.)  $W$ : {8,8,8,8,8,8,8,8,8,2} в экспериментах {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11} соответственно.

Численные результаты имитационного моделирования зависимости коэффициента готовности узла следующего перехода  $F_{УСП}$  от интенсивности поступления запросов передачи данных  $w_{зпд}$  приведены в таблице В.5.1.

Таблица В.5.1 Коэффициент готовности узла следующего перехода к обработке запросов передачи данных

Текущий узел	Соседний узел	Номер эксперимента	Интенсивность поступления запросов передачи данных	Интенсивность обработки запросов передачи данных	Коэффициент готовности соседнего узла
n0	n1	1	0,0266	0,0511	0,6579
		2	0,0396	0,0594	0,6003
		3	0,0467	0,0541	0,5365
		4	0,0527	0,0524	0,4984
		5	0,0712	0,0560	0,4403
		6	0,0927	0,0541	0,3686
		7	0,1164	0,0562	0,3258
		8	0,1566	0,0481	0,2350
		9	0,2487	0,0405	0,1399
		10	0,2511	0,0304	0,1081
		11	0,2785	0,0524	0,1585
	n2	1	0,0321	0,0535	0,6250
		2	0,0397	0,0544	0,5778
		3	0,0449	0,0548	0,5492
		4	0,0670	0,0636	0,4873
		5	0,0679	0,0554	0,4497
		6	0,0838	0,0441	0,3449
		7	0,1132	0,0518	0,3139
		8	0,1559	0,0494	0,2408
		9	0,2544	0,0324	0,1130
		10	0,2710	0,0366	0,1191
		11	0,2860	0,0538	0,1584
	n3	1	0,0228	0,0538	0,7023
		2	0,0432	0,0529	0,5503
		3	0,0582	0,0597	0,5064
		4	0,0568	0,0530	0,4825
		5	0,0635	0,0480	0,4306
		6	0,0948	0,0512	0,3510
		7	0,1203	0,0490	0,2894
		8	0,1547	0,0421	0,2139
		9	0,2347	0,0303	0,1143
		10	0,2704	0,0242	0,0820
		11	0,3195	0,0493	0,1338
n1	n0	1	0,0227	0,0480	0,6783
		2	0,0350	0,0442	0,5582
		3	0,0536	0,0613	0,5335
		4	0,0631	0,0627	0,4984
		5	0,0817	0,0630	0,4354
		6	0,1031	0,0623	0,3768
		7	0,1109	0,0535	0,3253
		8	0,1583	0,0494	0,2377
		9	0,2530	0,0354	0,1228
		10	0,0227	0,0309	0,1111
		11	0,0350	0,0511	0,1532

	n2	1	0,0237	0,0569	0,7059
		2	0,0391	0,0556	0,5870
		3	0,0607	0,0614	0,5027
		4	0,0677	0,0580	0,4614
		5	0,0674	0,0487	0,4193
		6	0,0913	0,0518	0,3619
		7	0,1122	0,0533	0,3220
		8	0,1572	0,0490	0,2377
		9	0,2356	0,0289	0,1092
		10	0,0237	0,0283	0,1024
		11	0,0391	0,0462	0,1406
	n3	1	0,0297	0,0597	0,6680
		2	0,0316	0,0546	0,6337
		3	0,0624	0,0653	0,5111
		4	0,0589	0,0629	0,5166
		5	0,0701	0,0501	0,4166
		6	0,0989	0,0564	0,3631
		7	0,1189	0,0549	0,3157
		8	0,1581	0,0452	0,2224
		9	0,2539	0,0313	0,1098
		10	0,0297	0,0292	0,1015
		11	0,0316	0,0520	0,1517
n2	n0	1	0,0311	0,0777	0,7143
		2	0,0371	0,0555	0,5992
		3	0,0513	0,0590	0,5348
		4	0,0653	0,0657	0,5014
		5	0,0672	0,0519	0,4356
		6	0,0852	0,0493	0,3663
		7	0,1144	0,0536	0,3189
		8	0,1575	0,0442	0,2192
		9	0,2537	0,0328	0,1144
		10	0,2603	0,0313	0,1073
		11	0,2741	0,0512	0,1573
	n1	1	0,0258	0,0538	0,6758
		2	0,0419	0,0503	0,5456
		3	0,0692	0,0752	0,5209
		4	0,0599	0,0557	0,4820
		5	0,0648	0,0531	0,4505
		6	0,0992	0,0576	0,3673
		7	0,1208	0,0554	0,3145
		8	0,1610	0,0458	0,2213
		9	0,2382	0,0333	0,1226
		10	0,2353	0,0263	0,1007
		11	0,2753	0,0437	0,1370
	n3	1	0,0254	0,0545	0,6822
		2	0,0358	0,0623	0,6349
		3	0,0542	0,0618	0,5329
		4	0,0529	0,0504	0,4877
		5	0,0719	0,0567	0,4409
		6	0,0911	0,0548	0,3753
		7	0,1286	0,0660	0,3391
		8	0,1781	0,0470	0,2087
		9	0,2484	0,0324	0,1155
		10	0,2573	0,0307	0,1065
		11	0,2749	0,0477	0,1479
n3	n0	1	0,0228	0,0453	0,6658
		2	0,0467	0,0607	0,5653
		3	0,0498	0,0540	0,5203
		4	0,0577	0,0537	0,4818
		5	0,0674	0,0515	0,4333
		6	0,0891	0,0488	0,3542
		7	0,1122	0,0504	0,3101
		8	0,1501	0,0424	0,2203
		9	0,2461	0,0343	0,1224
		10	0,2272	0,0211	0,0850
		11	0,2913	0,0469	0,1388
	n1	1	0,0329	0,0607	0,6488
		2	0,0424	0,0610	0,5897
		3	0,0543	0,0675	0,5540
		4	0,0657	0,0620	0,4854
		5	0,0647	0,0502	0,4370
		6	0,0913	0,0584	0,3901
		7	0,1136	0,0528	0,3176

		8	0,1534	0,0443	0,2241
		9	0,2437	0,0375	0,1332
		10	0,2445	0,0262	0,0969
		11	0,2777	0,0522	0,1583
	n2	1	0,0235	0,0392	0,6254
		2	0,0397	0,0569	0,5892
		3	0,0442	0,0531	0,5457
		4	0,0543	0,0535	0,4961
		5	0,0757	0,0587	0,4366
		6	0,0890	0,0470	0,3456
		7	0,1117	0,0575	0,3400
8	0,1454	0,0394	0,2131		
9	0,2264	0,0260	0,1030		
10	0,2275	0,0321	0,1238		
11	0,2669	0,0445	0,1428		

### В.6 Численные результаты оценки надежности интерфейса узла

В результате имитационного моделирования каждым узлом коммуникационной системы для каждого отношения соседства получены зависимости коэффициентов готовности  $F_{И}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{И}$  и восстановлений  $\mu_{И}$  интерфейсов передачи данных узла  $n0$  с узлом  $n1$  на интервале имитационного моделирования  $T_{exp} = 10^4$  секунд, при количестве повторных попыток передачи кадров данных в отдельном физическом канале  $e_{и,i} \in E_{И}$  равным  $r = 1$ . Численные результаты имитационного моделирования надежности интерфейсов приведены в таблицах В.6.1, В.6.2.

Таблица В.6.1 Значения коэффициента готовности интерфейса узла  $n0$  с узлом  $n1$ , полученные при имитационном моделировании  $t=10000$  с.;  $t_{00с}$  – время обновления отношений соседства;  $F_{И}$  – коэффициент готовности интерфейса; ИК.i – номер интерфейсного канала, где  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $P_{иск.ик.i}$  – вероятность исправного состояния ИК.i

Время в секундах

№	$t_{00с}$	$F_{И}$	ИК.1	$P_{иск.ик.1}$	ИК.2	$P_{иск.ик.2}$	ИК.3	$P_{иск.ик.3}$	ИК.4	$P_{иск.ик.4}$
1	501.094834	0.996572	8	0.809495	5	0.800852	4	0.795723	3	0.769442
2	723.494834	0.996474	8	0.802645	5	0.802218	4	0.790606	3	0.774324
3	933.894834	0.996552	8	0.806608	5	0.802428	4	0.783406	3	0.781980
4	1092.294834	0.996634	5	0.806090	4	0.804380	3	0.790287	1	0.777633
5	1254.694834	0.996543	5	0.806090	4	0.798789	3	0.790287	1	0.778693
6	1418.694834	0.995375	5	0.806090	4	0.796122	3	0.769723	1	0.750223
7	1515.494834	0.980857	5	0.782678	4	0.769609	1	0.757861	0	0.000000
8	1889.094834	0.996062	6	0.818010	5	0.789089	4	0.775028	2	0.770666
9	2304.294834	0.996596	8	0.809297	6	0.802018	5	0.783825	4	0.781916
10	2444.294834	0.995715	8	0.809297	7	0.783825	6	0.781916	5	0.761558
11	2709.894834	0.995602	8	0.785767	7	0.785675	5	0.782294	4	0.774036
12	2893.894834	0.994716	8	0.799745	7	0.785675	5	0.756497	4	0.755338
13	3077.094834	0.992953	8	0.799745	7	0.749020	5	0.747722	4	0.745371
14	3395.494834	0.993783	8	0.788305	7	0.761063	5	0.760159	4	0.755051
15	3556.294834	0.996551	8	0.821677	7	0.804602	6	0.788305	5	0.761063
16	3700.294834	0.996186	8	0.828019	7	0.810042	6	0.761063	5	0.758498
17	3893.894834	0.994851	8	0.828019	6	0.779649	5	0.768602	1	0.726734
18	3923.494834	0.995126	8	0.828019	6	0.779649	5	0.768602	1	0.737536
19	4056.294834	0.994994	8	0.815852	6	0.786423	5	0.768602	1	0.737536
20	4497.894834	0.994300	8	0.796062	6	0.788499	5	0.759818	4	0.737795
21	4651.494834	0.995592	8	0.796062	6	0.788499	5	0.782475	4	0.762501
22	4805.894834	0.995356	8	0.785190	7	0.782475	6	0.778357	5	0.771941
23	5037.094834	0.996898	8	0.815796	7	0.795859	6	0.792347	5	0.789717
24	5205.094834	0.996696	8	0.808028	7	0.800295	6	0.792087	4	0.781495
25	5396.294834	0.994723	8	0.792087	7	0.774470	6	0.772208	3	0.757398
26	6113.094834	0.985190	7	0.794552	4	0.783516	3	0.781341	0	0.000000
27	7089.894834	0.995948	8	0.817029	7	0.784646	6	0.776310	3	0.769618
28	7255.494834	0.995372	8	0.783455	7	0.783352	6	0.782164	5	0.769168
29	7339.494834	0.995146	8	0.783455	7	0.783352	6	0.772098	5	0.770819

30	7643.494834	0.994600	7	0.783455	6	0.775157	5	0.772890	4	0.758695
31	7856.294834	0.991240	7	0.772890	6	0.758695	5	0.750931	3	0.712068
32	8361.094834	0.994913	7	0.784939	6	0.780089	5	0.772890	4	0.763625
33	8559.494834	0.993737	7	0.784033	5	0.769441	4	0.760237	2	0.749027
34	8872.294834	0.993832	7	0.802929	5	0.771821	4	0.758172	2	0.735485
35	9208.294834	0.991442	7	0.771821	6	0.758370	5	0.745477	4	0.723755
36	9371.494834	0.992357	6	0.803430	5	0.758370	4	0.744386	2	0.720333
37	9578.694834	0.994139	6	0.796721	5	0.784988	4	0.751211	3	0.744386
38	9744.294834	0.994778	7	0.814562	6	0.784988	5	0.768812	4	0.731836

Таблица В.6.2 Значения коэффициента готовности интерфейса узла  $n1$  с узлом  $n0$ , полученные при имитационном моделировании  $t=10000$  с.;  $t_{00c}$  – время обновления отношений соседства;  $F_{и}$  – коэффициент готовности интерфейса; ИК. $i$  – номер интерфейсного канала, где  $i=1, 2, 3, 4$ ;  $P_{иск.ик.i}$  – вероятность исправного состояния ИК. $i$

Время в секундах

№	$t_{00c}$	$F_{и}$	ИК.1	$P_{иск.ик.1}$	ИК.2	$P_{иск.ик.2}$	ИК.3	$P_{иск.ик.3}$	ИК.4	$P_{иск.ик.4}$
1	212.294834	0.997026	8	0.818978	7	0.807584	5	0.796812	4	0.777664
2	364.294834	0.996291	8	0.807584	7	0.796812	5	0.790499	4	0.766825
3	582.694834	0.995537	8	0.807584	5	0.796812	4	0.773528	3	0.750827
4	887.494834	0.993628	8	0.800688	5	0.764496	3	0.763252	2	0.733242
5	1084.294834	0.995556	8	0.795465	7	0.793946	5	0.772936	3	0.765751
6	1428.294834	0.995073	8	0.791686	7	0.777253	5	0.772667	3	0.767053
7	1580.294834	0.995579	8	0.790637	7	0.787487	5	0.777253	3	0.772667
8	1722.694834	0.995412	8	0.790637	5	0.787487	3	0.772667	2	0.770690
9	2040.294834	0.996923	8	0.806076	6	0.798605	5	0.795863	2	0.792929
10	2138.694834	0.996130	8	0.795863	6	0.792929	5	0.784175	2	0.779573
11	2285.094834	0.996298	8	0.801037	6	0.792929	5	0.783813	2	0.783417
12	2543.494834	0.982194	8	0.801037	5	0.766764	1	0.758909	0	0.000000
13	2944.294834	0.993705	8	0.787070	7	0.772562	5	0.755206	3	0.747591
14	3565.894834	0.994912	8	0.798616	7	0.778974	6	0.766264	4	0.760281
15	3731.494834	0.991653	8	0.779426	7	0.766265	6	0.756537	4	0.702586
16	3906.694834	0.991054	8	0.797657	6	0.763823	5	0.730849	4	0.701601
17	4213.894834	0.969569	8	0.751088	5	0.731154	4	0.727640	0	0.000000
18	4347.494834	0.970512	8	0.746819	5	0.737266	4	0.731450	0	0.000000
19	4491.494834	0.972637	8	0.750489	5	0.746819	4	0.734907	0	0.000000
20	4800.294834	0.994453	8	0.811780	7	0.760042	5	0.759908	2	0.757372
21	4954.694834	0.992909	8	0.811780	7	0.760042	6	0.746981	5	0.723049
22	5218.694834	0.990166	8	0.761402	7	0.748222	6	0.735576	5	0.723772
23	5473.094834	0.993291	8	0.786797	7	0.760617	6	0.754301	5	0.748222
24	5637.894834	0.995572	8	0.809326	6	0.789487	5	0.770149	4	0.761905
25	5805.094834	0.995694	8	0.809326	6	0.789487	5	0.770149	4	0.766985
26	5957.894834	0.996092	8	0.809326	6	0.790404	5	0.779040	4	0.774373
27	7246.694834	0.993566	8	0.806375	7	0.759343	6	0.747803	4	0.747065
28	7502.694834	0.992173	7	0.792849	6	0.747803	5	0.747065	4	0.732760
29	7824.294834	0.981881	7	0.781841	5	0.766412	3	0.732760	2	0.546437
30	7882.694834	0.995655	7	0.946548	3	0.786292	2	0.766412	0	0.000000
31	8037.894834	0.999038	7	0.946548	6	0.798784	4	0.794226	3	0.780889
32	8726.694834	0.999511	7	0.973496	6	0.793809	5	0.789684	4	0.788048
33	8997.894834	0.998866	8	0.964167	6	0.766788	5	0.761650	3	0.747631
34	9141.894834	0.998958	8	0.952001	6	0.805371	5	0.774147	3	0.761650
35	9346.694834	0.998808	5	0.952001	4	0.805371	3	0.773925	2	0.736630
36	9569.894834	0.995104	8	0.786748	5	0.779725	4	0.773925	2	0.768446
37	9724.294834	0.998973	8	0.952475	7	0.794829	5	0.779725	4	0.768446
38	9885.894834	0.999286	8	0.930112	7	0.838107	5	0.827603	4	0.794829

Значения интенсивностей отказов  $\lambda_{и}$  интерфейса  $И_{01}$  узла  $n0$  с узлом  $n1$ , полученные в ходе моделирования приведены в таблице В.6.3.

Таблица В.6.3 Интенсивность отказов  $\lambda_{и}$  интерфейса  $И_{01}$  узла  $n0$  с узлом  $n1$  при имитационном моделировании длительностью  $t=10000$  с.;  $t_{00c}$  – время обновления отношений соседства;  $F_{и}$  – коэффициент готовности интерфейса;  $T_{00c}$  – действительный период обновления отношений соседства;  $\lambda_{и}$  – интенсивность отказов интерфейса;  $\mu_{и}$  – интенсивность восстановления интерфейса

Время в секундах

№	$t_{00c}$	$F_{И}$	$T_{00c}$	$\lambda_{И}$	$\mu_{И}$
0	0	-	-	-	-
1	501,094834	0,996572	501,09483	0,002002495	0,582156
2	723,494834	0,996474	222,4	0,004512313	1,275214
3	933,894834	0,996552	210,4	0,004769296	1,378437
4	1092,29483	0,996634	158,4	0,006334453	1,875559
5	1254,69483	0,996543	162,4	0,006178996	1,781208
6	1418,69483	0,995375	164	0,006125893	1,318392
7	1515,49483	0,980857	96,8	0,010532196	0,539653
8	1889,09483	0,996062	373,6	0,002687242	0,6797
9	2304,29483	0,996596	415,2	0,002416704	0,707543
10	2444,29483	0,995715	140	0,007173596	1,666944
11	2709,89483	0,995602	265,6	0,003781692	0,856085
12	2893,89483	0,994716	184	0,005463653	1,028536
13	3077,09483	0,992953	183,2	0,005497254	0,774587
14	3395,49483	0,993783	318,4	0,003160351	0,50518
15	3556,29483	0,996551	160,8	0,006240429	1,803104
16	3700,29483	0,996186	144	0,006971032	1,820777
17	3893,89483	0,994851	193,6	0,005192023	1,003164
18	3923,49483	0,995126	29,6	0,033949252	6,931429
19	4056,29483	0,994994	132,8	0,007568006	1,504219
20	4497,89483	0,9943	441,6	0,002277474	0,397279
21	4651,49483	0,995592	153,6	0,006539242	1,476955
22	4805,89483	0,995356	154,4	0,006506902	1,394635
23	5037,09483	0,996898	231,2	0,004338718	1,394345
24	5205,09483	0,996696	168	0,005972113	1,801568
25	5396,29483	0,994723	191,2	0,005257871	0,991117
26	6113,09483	0,98519	716,8	0,001416061	0,094199
27	7089,89483	0,995948	976,8	0,001027916	0,252653
28	7255,49483	0,995372	165,6	0,006066724	1,304807
29	7339,49483	0,995146	84	0,011962829	2,452567
30	7643,49483	0,9946	304	0,003307333	0,609162
31	7856,29483	0,99124	212,8	0,004740777	0,536444
32	8361,09483	0,994913	504,8	0,001991111	0,389421
33	8559,49483	0,993737	198,4	0,005072089	0,804778
34	8872,29483	0,993832	312,8	0,003216772	0,518309
35	9208,29483	0,991442	336	0,003001881	0,347767
36	9371,49483	0,992357	163,2	0,006174644	0,801708
37	9578,69483	0,994139	207,2	0,004854708	0,823452
38	9744,29483	0,994778	165,6	0,006070347	1,156386

Таблица В.6.4 Интенсивность отказов  $\lambda_{И}$  интерфейса  $I_{10}$  узла  $n1$  с узлом  $n0$  при имитационном моделировании длительностью  $t=10000$  с.;  $t_{00c}$  – время обновления отношений соседства;  $F_{И}$  – коэффициент готовности интерфейса;  $T_{00c}$  – действительный период обновления отношений соседства;  $\lambda_{И}$  – интенсивность отказов интерфейса;  $\mu_{И}$  – интенсивность восстановления интерфейса

Время в секундах

№	№	$t_{00c}$	$F_{И}$	$T_{00c}$	$\lambda_{И}$
0	0	-	-	-	-
1	212,294834	0,997026	212,29483	0,004724	1,58387
2	364,294834	0,996291	152	0,006603	1,773779
3	582,694834	0,995537	218,4	0,004599	1,025936
4	887,494834	0,993628	304,8	0,003302	0,514884
5	1084,29483	0,995556	196,8	0,005104	1,143407
6	1428,29483	0,995073	344	0,002921	0,590009
7	1580,29483	0,995579	152	0,006608	1,488113
8	1722,69483	0,995412	142,4	0,007055	1,530617
9	2040,29483	0,996923	317,6	0,003158	1,023274
10	2138,69483	0,99613	98,4	0,010202	2,625995
11	2285,09483	0,996298	146,4	0,006856	1,845111
12	2543,49483	0,982194	258,4	0,00394	0,217341
13	2944,29483	0,993705	400,8	0,002511	0,396348
14	3565,89483	0,994912	621,6	0,001617	0,316185
15	3731,49483	0,991653	165,6	0,006089	0,723451
16	3906,69483	0,991054	175,2	0,005759	0,638024
17	4213,89483	0,969569	307,2	0,003357	0,10697
18	4347,49483	0,970512	133,6	0,007712	0,253833
19	4491,49483	0,972637	144	0,00714	0,25379
20	4800,29483	0,994453	308,8	0,003256	0,583801

21	4954,69483	0,992909	154,4	0,006523	0,913367
22	5218,69483	0,990166	264	0,003825	0,385182
23	5473,09483	0,993291	254,4	0,003957	0,585902
24	5637,89483	0,995572	164,8	0,006095	1,370362
25	5805,09483	0,995694	167,2	0,006007	1,38896
26	5957,89483	0,996092	152,8	0,006657	1,674642
27	7246,69483	0,993566	1288,8	0,000781	0,120596
28	7502,69483	0,992173	256	0,003937	0,499074
29	7824,29483	0,981881	321,6	0,003167	0,171613
30	7882,69483	0,995655	58,4	0,017198	3,940918
31	8037,89483	0,999038	155,2	0,00645	6,697816
32	8726,69483	0,999511	688,8	0,001453	2,968917
33	8997,89483	0,998866	271,2	0,003692	3,251601
34	9141,89483	0,998958	144	0,006952	6,664534
35	9346,69483	0,998808	204,8	0,004889	4,096319
36	9569,89483	0,995104	223,2	0,004502	0,915091
37	9724,29483	0,998973	154,4	0,006483	6,306411
38	9885,89483	0,999286	161,6	0,006193	8,666833

### В.7 Численные результаты оценки надежности трассы передачи данных

На основе полученных показателей надежности интерфейсов при каждом событии обновления отношений соседства узлом  $n_0$  выполнялся расчет коэффициента готовности  $F_{\text{ТПД.01}}$  трассы передачи данных с узлом  $n_1$ . Численные результаты имитационного моделирования приведены в таблице В.7.1

Таблица В.7.1 Коэффициент готовности  $F_{\text{ТПД.01}}$ , интенсивности отказов  $\lambda_{\text{ТПД.01}}$  и восстановлений  $\mu_{\text{ТПД.01}}$  трассы передачи данных ТПД.01; ( $F_{\text{И.01}}$ ,  $F_{\text{И.10}}$ ) – коэффициенты готовности интерфейсов  $\text{И}_0$ ,  $\text{И}_1$  соответственно;  $t_{00\text{С}}$  – время обновления отношений соседства

Время в секундах

$t_{00\text{С}}$	$F_{\text{ТПД.01}}$	$\lambda_{\text{ТПД.01}}$	$\mu_{\text{ТПД.01}}$	$F_{\text{И.01}}$	$F_{\text{И.10}}$
364,2948	-	0,00660344	-	-	0,996291
501,0948	0,992875714	0,008605935	1,199366	0,996572	0,996291
582,6948	0,992124299	0,006601776	0,831644	0,996572	0,995537
723,4948	0,992026737	0,009111594	1,133657	0,996474	0,995537
887,4948	0,990124469	0,007814192	0,783454	0,996474	0,993628
933,8948	0,990201972	0,008071175	0,815684	0,996552	0,993628
1084,295	0,992123323	0,009873279	1,24361	0,996552	0,995556
1092,295	0,992204958	0,011438436	1,455961	0,996634	0,995556
1254,695	0,992114363	0,011282979	1,419544	0,996543	0,995556
1418,695	0,990951554	0,011229876	1,229853	0,995375	0,995556
1428,295	0,990470788	0,009047263	0,940377	0,995375	0,995073
1515,495	0,976024319	0,013453566	0,54768	0,980857	0,995073
1580,295	0,976520632	0,017140358	0,712877	0,980857	0,995579
1722,695	0,976356828	0,017587036	0,726266	0,980857	0,995412
1889,095	0,991492067	0,009742082	1,135317	0,996062	0,995412
2040,295	0,992997117	0,005845575	0,828893	0,996062	0,996923
2138,695	0,99220724	0,012889326	1,641124	0,996062	0,99613
2285,095	0,992374578	0,009543224	1,241958	0,996062	0,996298
2304,295	0,992906602	0,009272686	1,297955	0,996596	0,996298
2444,295	0,992028863	0,014029578	1,746018	0,995715	0,996298
2543,495	0,977985298	0,011113723	0,493718	0,995715	0,982194
2709,895	0,977874311	0,007721819	0,341276	0,995602	0,982194
2893,895	0,977004086	0,00940378	0,399529	0,994716	0,982194
2944,295	0,988454261	0,007974469	0,682711	0,994716	0,993705
3077,095	0,98670236	0,00800807	0,594209	0,992953	0,993705

3395,495	0,987527136	0,005671167	0,449009	0,993783	0,993705
3556,295	0,99027771	0,008751245	0,891371	0,996551	0,993705
3565,895	0,991480548	0,007857408	0,914433	0,996551	0,994912
3700,295	0,991117405	0,008588011	0,958248	0,996186	0,994912
3731,495	0,987870836	0,013060508	1,063725	0,996186	0,991653
3893,895	0,986546979	0,011281499	0,827303	0,994851	0,991653
3906,695	0,985951063	0,010951308	0,76856	0,994851	0,991054
3923,495	0,986223603	0,039708537	2,842652	0,995126	0,991054
4056,295	0,986092784	0,013327291	0,944973	0,994994	0,991054
4213,895	0,964715335	0,010925383	0,29871	0,994994	0,969569
4347,495	0,965653616	0,015280461	0,429612	0,994994	0,970512
4491,495	0,967767979	0,014707817	0,441603	0,994994	0,972637
4497,895	0,96709297	0,009417285	0,276761	0,9943	0,972637
4651,495	0,968349616	0,013679053	0,418513	0,995592	0,972637
4800,295	0,990069451	0,009795647	0,97662	0,995592	0,994453
4805,895	0,989834761	0,009763307	0,950697	0,995356	0,994453
4954,695	0,988297931	0,01302984	1,100435	0,995356	0,992909
5037,095	0,989828997	0,010861656	1,057042	0,996898	0,992909
5205,095	0,989628429	0,012495051	1,192245	0,996696	0,992909
5218,695	0,986894491	0,009797612	0,737797	0,996696	0,990166
5396,295	0,984940894	0,00908337	0,594098	0,994723	0,990166
5473,095	0,988049403	0,009215239	0,761896	0,994723	0,993291
5637,895	0,990318367	0,011352821	1,161261	0,994723	0,995572
5805,095	0,990439723	0,011264597	1,167006	0,994723	0,995694
5957,895	0,990835623	0,01182805	1,278827	0,994723	0,996092
6113,095	0,981339879	0,00798624	0,419998	0,98519	0,996092
7089,895	0,992055836	0,007598095	0,948839	0,995948	0,996092
7246,695	0,989540072	0,001808856	0,171123	0,995948	0,993566
7255,495	0,988967778	0,006847664	0,613849	0,995372	0,993566
7339,495	0,988743232	0,012743769	1,119355	0,995146	0,993566
7502,695	0,987356993	0,015899894	1,241704	0,995146	0,992173
7643,495	0,986815267	0,007244398	0,542209	0,9946	0,992173
7824,295	0,976578841	0,006474166	0,26995	0,9946	0,981881
7856,295	0,973279721	0,00790761	0,288033	0,99124	0,981881
7882,695	0,986933063	0,02193879	1,657015	0,99124	0,995655
8037,895	0,990286428	0,01119028	1,140835	0,99124	0,999038
8361,095	0,993955895	0,008440614	1,388063	0,994913	0,999038
8559,495	0,992781025	0,011521592	1,584493	0,993737	0,999038
8726,695	0,993251063	0,0065246	0,960235	0,993737	0,999511
8872,295	0,993346016	0,004669283	0,697058	0,993832	0,999511
8997,895	0,992704994	0,006908274	0,940079	0,993832	0,998866
9141,895	0,992796427	0,01016846	1,401417	0,993832	0,998958
9208,295	0,990408916	0,009953569	1,02784	0,991442	0,998958
9346,695	0,9902602	0,007890521	0,802241	0,991442	0,998808
9371,495	0,99117411	0,011063284	1,24244	0,992357	0,998808
9569,895	0,98749842	0,010676974	0,843373	0,992357	0,995104
9578,695	0,989271696	0,009357038	0,862825	0,994139	0,995104
9724,295	0,99311802	0,01133805	1,63616	0,994139	0,998973
9744,295	0,993756363	0,012553689	1,998083	0,994778	0,998973
9744,295	0,993756363	0,012553689	1,998083	0,994778	0,998973

**В.8 Численные результаты имитационного моделирования оценки надежности линии передачи данных**

В результате имитационного моделирования в течение  $T_{exp} = 10^4$  секунд получен коэффициент готовности  $F_{ЛПД.01}$  линии  $l_{01}$ . Численные результаты имитационного моделирования приведены в таблице В.8.1, В.8.2

Таблица В.8.1 Коэффициент готовности  $F_{ЛПД.01}$  линии передачи данных  $l_{01}$  при различных значениях коэффициентов готовности трассы установления соединения  $F_{ТУС.01}$ , узла следующего перехода  $F_{УСП.1}$ , трассы передачи данных  $F_{ТПД.01}$  на интервале имитационного моделирования  $T_{exp} = 10^4$ ;  $t_{00С}$  – время обновления отношений соседства;  $w_{ЗПД}$  – интенсивность запросов передачи данных

Время в секундах

$t_{00С}$	Коэффициент готовности ТУС ( $F_{ТУС.01}$ )	Коэффициент готовности УСП ( $F_{УСП.1}$ )			Коэффициент готовности ТПД ( $F_{ТПД.01}$ )
		$w_{ЗПД} = 0,0266$	$w_{ЗПД} = 0,0712$	$w_{ЗПД} = 0,2511$	
501,0950	0,8651	0,6579	0,4403	0,1081	0,9929
582,6950	0,9793	0,6580	0,4404	0,1082	0,9921
723,4950	0,9945	0,6581	0,4405	0,1083	0,9920
887,4950	0,9944	0,6582	0,4406	0,1084	0,9901
933,8950	0,9846	0,6583	0,4407	0,1085	0,9902
1084,2950	0,9948	0,6584	0,4408	0,1086	0,9921
1092,2950	0,9949	0,6585	0,4409	0,1087	0,9922
1254,6950	0,9989	0,6586	0,4410	0,1088	0,9921
1418,6950	0,9970	0,6587	0,4411	0,1089	0,9910
1428,2950	0,9970	0,6588	0,4412	0,1090	0,9905
1515,4950	0,9991	0,6589	0,4413	0,1091	0,9760
1580,2950	0,9995	0,6590	0,4414	0,1092	0,9765
1722,6950	0,9997	0,6591	0,4415	0,1093	0,9764
1889,0950	0,9994	0,6592	0,4416	0,1094	0,9915
2040,2950	0,9986	0,6593	0,4417	0,1095	0,9930
2138,6950	0,9953	0,6594	0,4418	0,1096	0,9922
2285,0950	0,9961	0,6595	0,4419	0,1097	0,9924
2304,2950	0,9958	0,6596	0,4420	0,1098	0,9929
2444,2950	0,9879	0,6597	0,4421	0,1099	0,9920
2543,4950	0,9970	0,6598	0,4422	0,1100	0,9780
2709,8950	0,9990	0,6599	0,4423	0,1101	0,9779
2893,8950	0,9980	0,6600	0,4424	0,1102	0,9770
2944,2950	0,9981	0,6601	0,4425	0,1103	0,9885
3077,0950	0,9965	0,6602	0,4426	0,1104	0,9867
3395,4950	0,9946	0,6603	0,4427	0,1105	0,9875
3556,2950	0,9982	0,6604	0,4428	0,1106	0,9903
3565,8950	0,9970	0,6605	0,4429	0,1107	0,9915
3700,2950	0,9915	0,6606	0,4430	0,1108	0,9911
3731,4950	0,9894	0,6607	0,4431	0,1109	0,9879
3893,8950	0,9876	0,6608	0,4432	0,1110	0,9865
3906,6950	0,9885	0,6609	0,4433	0,1111	0,9860
3923,4950	0,9888	0,6610	0,4434	0,1112	0,9862
4056,2950	0,9894	0,6611	0,4435	0,1113	0,9861
4213,8950	0,9919	0,6612	0,4436	0,1114	0,9647
4347,4950	0,9920	0,6613	0,4437	0,1115	0,9657
4491,4950	0,9400	0,6614	0,4438	0,1116	0,9678
4497,8950	0,9418	0,6615	0,4439	0,1117	0,9671
4651,4950	0,9171	0,6616	0,4440	0,1118	0,9683
4800,2950	0,9144	0,6617	0,4441	0,1119	0,9901
4805,8950	0,9093	0,6618	0,4442	0,1120	0,9898
4954,6950	0,9081	0,6619	0,4443	0,1121	0,9883
5037,0950	0,9017	0,6620	0,4444	0,1122	0,9898

5205,0950	0,9017	0,6621	0,4445	0,1123	0,9896
5218,6950	0,9011	0,6622	0,4446	0,1124	0,9869
5396,2950	0,8562	0,6623	0,4447	0,1125	0,9849
5473,0950	0,9040	0,6624	0,4448	0,1126	0,9880
5637,8950	0,9425	0,6625	0,4449	0,1127	0,9903
5805,0950	0,9716	0,6626	0,4450	0,1128	0,9904
5957,8950	0,9857	0,6627	0,4451	0,1129	0,9908
6113,0950	0,9767	0,6628	0,4452	0,1130	0,9813
7089,8950	0,9940	0,6629	0,4453	0,1131	0,9921
7246,6950	0,9985	0,6630	0,4454	0,1132	0,9895
7255,4950	0,9985	0,6631	0,4455	0,1133	0,9890
7339,4950	0,9984	0,6632	0,4456	0,1134	0,9887
7502,6950	0,9987	0,6633	0,4457	0,1135	0,9874
7643,4950	0,9987	0,6634	0,4458	0,1136	0,9868
7824,2950	0,9978	0,6635	0,4459	0,1137	0,9766
7856,2950	0,9978	0,6636	0,4460	0,1138	0,9733
7882,6950	0,9979	0,6637	0,4461	0,1139	0,9869
8037,8950	0,9985	0,6638	0,4462	0,1140	0,9903
8361,0950	0,9998	0,6639	0,4463	0,1141	0,9940
8559,4950	1,0000	0,6640	0,4464	0,1142	0,9928
8726,6950	1,0000	0,6641	0,4465	0,1143	0,9933
8872,2950	0,9996	0,6642	0,4466	0,1144	0,9933
8997,8950	0,9999	0,6643	0,4467	0,1145	0,9927
9141,8950	0,9998	0,6644	0,4468	0,1146	0,9928
9208,2950	0,9998	0,6645	0,4469	0,1147	0,9904
9346,6950	0,9998	0,6646	0,4470	0,1148	0,9903
9371,4950	0,9998	0,6647	0,4471	0,1149	0,9912
9569,8950	0,9997	0,6648	0,4472	0,1150	0,9875
9578,6950	0,9998	0,6649	0,4473	0,1151	0,9893

Продолжение таблицы В.8.1 Коэффициент готовности  $F_{\text{ЛПД},01}$  линии передачи данных  $l_{01}$  при различных значениях коэффициентов готовности трассы установления соединения  $F_{\text{ТУС},01}$ , узла следующего перехода  $F_{\text{УСП},1}$ , трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД},01}$  на интервале имитационного моделирования  $T_{\text{exp}} = 10^4$ ;  $t_{00c}$  – время обновления отношений соседства;  $w_{\text{зпд}}$  – интенсивность запросов передачи данных

Время в секундах

$t_{00c}$	Коэффициент готовности ЛПД ( $F_{\text{ЛПД},01}$ )		
	$w_{\text{зпд}} = 0,0266$	$w_{\text{зпд}} = 0,0712$	$w_{\text{зпд}} = 0,2511$
501,0950	0,5972	0,3843	0,1351
582,6950	0,6337	0,4125	0,1475
723,4950	0,6491	0,4335	0,1704
887,4950	0,6440	0,4275	0,1642
933,8950	0,6372	0,4176	0,1528
1084,2950	0,6489	0,4328	0,1691
1092,2950	0,6498	0,4339	0,1704
1254,6950	0,6489	0,4317	0,1669
1418,6950	0,6484	0,4316	0,1671
1428,2950	0,6480	0,4311	0,1666
1515,4950	0,6399	0,4269	0,1669
1580,2950	0,6402	0,4272	0,1672
1722,6950	0,6383	0,4248	0,1644
1889,0950	0,6476	0,4299	0,1648
2040,2950	0,6507	0,4336	0,1686
2138,6950	0,6510	0,4347	0,1705
2285,0950	0,6464	0,4278	0,1622
2304,2950	0,6517	0,4354	0,1712
2444,2950	0,5761	0,3427	0,0940

2543,4950	0,5799	0,3484	0,0978
2709,8950	0,6049	0,3762	0,1160
2893,8950	0,6365	0,4216	0,1603
2944,2950	0,6193	0,3913	0,1265
3077,0950	0,6266	0,4020	0,1364
3395,4950	0,5269	0,2830	0,0628
3556,2950	0,5339	0,2933	0,0679
3565,8950	0,5868	0,3514	0,0981
3700,2950	0,5424	0,3042	0,0734
3731,4950	0,5567	0,3262	0,0867
3893,8950	0,5401	0,3050	0,0747
3906,6950	0,5794	0,3477	0,0977
3923,4950	0,5470	0,3338	0,0983
4056,2950	0,6068	0,3805	0,1204
4213,8950	0,6221	0,4085	0,1505
4347,4950	0,6320	0,4220	0,1656
4491,4950	0,6271	0,4184	0,1644
4497,8950	0,6273	0,4187	0,1648
4651,4950	0,3321	0,1496	0,0266
4800,2950	0,3845	0,1761	0,0314
4805,8950	0,5374	0,3158	0,0857
4954,6950	0,2818	0,1210	0,0206
5037,0950	0,4834	0,2706	0,0667
5205,0950	0,5556	0,3609	0,1359
5218,6950	0,5577	0,3614	0,1343
5396,2950	0,5437	0,3531	0,1340
5473,0950	0,5313	0,3437	0,1299
5637,8950	0,5017	0,2887	0,0754
5805,0950	0,5437	0,3168	0,0836
5957,8950	0,5362	0,3079	0,0786
6113,0950	0,5309	0,3013	0,0750
7089,8950	0,6164	0,3938	0,1327
7246,6950	0,6490	0,4332	0,1696
7255,4950	0,6489	0,4334	0,1702
7339,4950	0,6488	0,4334	0,1703
7502,6950	0,6483	0,4332	0,1704
7643,4950	0,6476	0,4323	0,1693
7824,2950	0,6372	0,4221	0,1604
7856,2950	0,6382	0,4257	0,1662
7882,6950	0,6475	0,4325	0,1699
8037,8950	0,6494	0,4333	0,1695
8361,0950	0,5943	0,3567	0,0999
8559,4950	0,6511	0,4345	0,1699
8726,6950	0,6391	0,4157	0,1478
8872,2950	0,6205	0,3876	0,1210
8997,8950	0,6244	0,3952	0,1284
9141,8950	0,6118	0,3807	0,1176
9208,2950	0,6128	0,3829	0,1197
9346,6950	0,6392	0,4180	0,1515
9371,4950	0,6426	0,4231	0,1573
9569,8950	0,6400	0,4220	0,1578
9578,6950	0,6452	0,4282	0,1641

Таблица В.8.2 Средние значения и среднеквадратические отклонения коэффициента готовности  $F_{\text{ЛПД.01}}$  линии передачи данных  $l_{01}$ , коэффициентов готовности: трассы установления соединения  $F_{\text{ТУС.01}}$ , узла следующего перехода  $F_{\text{УСП.1}}$ , трассы передачи данных  $F_{\text{ТПД.01}}$ ;  $W_{\text{ЗПД}}$  – интенсивность запросов передачи данных

	Коэффициент готовности	Коэффициент	Коэффициент готовности	Коэффициент
--	------------------------	-------------	------------------------	-------------

	ЛПД ( $F_{\text{ЛПД.01}}$ )			готовности ТУС ( $F_{\text{ТУС.01}}$ )	УСП ( $F_{\text{УСП.1}}$ )			готовности ТПД ( $F_{\text{ТПД.01}}$ )
	$w_{\text{зпд}}$ = 0,0266	$w_{\text{зпд}}$ = 0,0712	$w_{\text{зпд}}$ = 0,2511		$w_{\text{зпд}}$ = 0,0266	$w_{\text{зпд}}$ = 0,0712	$w_{\text{зпд}}$ = 0,2511	
Среднее значение параметра	0,5974	0,3794	0,1319	0,9791	0,6614	0,4438	0,1116	0,9868
Среднеквадратическое отклонение	0,0723	0,0684	0,0410	0,0360	0,0021	0,0021	0,0021	0,0074