

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский государственный университет науки и
технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

На правах рукописи



Максютин Андрей Сергеевич

**КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
БОРТОВЫХ СИСТЕМ ПРИ СОЗДАНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Мурыгин Александр Владимирович

Красноярск 2026

Оглавление

| | |
|--|----|
| Оглавление..... | 2 |
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1. Технология SpaceWire в отечественной космической отрасли. | 12 |
| 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИИ SPACEWIRE..... | 12 |
| 1.1.1. Разработка и развитие технологии SpaceWire. | 12 |
| 1.1.2. Ключевые положения стандарта SpaceWire..... | 14 |
| 1.1.3. Транспортные протоколы, работающие совместно со SpaceWire..... | 17 |
| 1.2. ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ SPACEWIRE..... | 19 |
| 1.2.1. Основные задачи, ставящиеся в процессе создания систем на базе SpaceWire..... | 20 |
| 1.2.2. Исследовательские задачи, ставящиеся в процессе создания систем на базе SpaceWire..... | 22 |
| 1.2.3. Применение моделирования для поддержки процесса создания систем на базе SpaceWire..... | 23 |
| 1.3. ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЛЕКСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМ НА БАЗЕ SPACEWIRE. | 25 |
| 1.3.1. Получение информации об объекте моделирования. | 25 |
| 1.3.2. Определение задач комплекса моделирования. | 30 |
| 1.3.3. Определение конфигурационных параметров комплекса моделирования. | 31 |
| 1.4. ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ. | 37 |
| 2. Технические решения для моделирования работы распределенных бортовых систем на базе SpaceWire..... | 40 |
| 2.1. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. | 40 |
| 2.1.1. Modeling of SpaceWire Traffic. | 41 |
| 2.1.2. Simulator for High-speed Networks. | 43 |
| 2.1.3. SpaceWire Automated NetWork Design and Simulation. | 45 |

| | |
|---|-----|
| 2.1.4. Прочие разработки в области имитационного моделирования. .. | 48 |
| 2.2. АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ..... | 49 |
| 2.2.1. Специализированное оборудование SpaceWire..... | 50 |
| 2.2.2. SpaceWire Interface Simulator..... | 57 |
| 2.2.3. iSAFT Protocol Testing and Validation System..... | 58 |
| 2.2.4. Прочие разработки в области аппаратно-программного моделирования..... | 60 |
| 2.3. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ..... | 66 |
| 2.4. ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ..... | 68 |
| 3. Проведение исследований по проектированию и разработке комплекса моделирования работы систем на базе SpaceWire..... | 70 |
| 3.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ..... | 70 |
| 3.1.1. Выбор вида моделирования..... | 71 |
| 3.1.2. Подбор специализированного оборудования..... | 72 |
| 3.1.3. Формирование итоговой структуры комплекса моделирования..... | 75 |
| 3.2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ..... | 78 |
| 3.2.1. Разработка алгоритмов функционирования модели системы на базе SpaceWire..... | 78 |
| 3.2.2. Разработка алгоритмов анализа информационного взаимодействия..... | 94 |
| 3.3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ..... | 99 |
| 3.3.1. Описание первого этапа проведения исследования..... | 99 |
| 3.3.2. Описание второго этапа проведения исследования..... | 102 |
| 3.4. АВТОНОМНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ НА БАЗЕ SPACEWIRE..... | 112 |
| 3.5. ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ..... | 114 |
| 4. Проведение экспериментов и анализ результатов..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| 4.1. ИНФРАСТРУКТУРА СИСТЕМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ..... | 117 |
| 4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ОТДЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ..... | 119 |
| 4.2.1. Алгоритм передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков. | 120 |
| 4.2.2. Алгоритм передачи данных по запросу. | 122 |
| 4.2.3. Алгоритм оценки искажений передаваемых данных. | 123 |
| 4.3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ..... | 125 |
| 4.3.1. Конфигурационные параметры комплекса моделирования..... | 125 |
| 4.3.2. Определение значений характеристик информационных потоков..... | 127 |
| 4.3.3. Исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов..... | 129 |
| 4.4. ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ. | 134 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 137 |
| Список литературы | 142 |
| Приложение А | 154 |
| Приложение Б..... | 169 |
| Приложение В | 181 |
| Приложение Г | 188 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Распределенные бортовые системы космических аппаратов (КА) состоят из множества элементов, обеспечивающих выполнение задачи по передаче данных бортовой аппаратуры. Существуют различные технологии информационного взаимодействия, разработанные для применения на КА. В отечественной космической отрасли в качестве такой технологии на протяжении более тридцати лет применяется мультиплексный канал информационного обмена (МКИО). В условиях постепенного увеличения требований, предъявляемых к обеспечению передачи данных на борту КА, обусловленных прежде всего увеличением интенсивности информационных потоков, возникает необходимость перехода на новую технологию, обладающую лучшими техническими характеристиками.

В качестве такой технологии была выбрана технология SpaceWire, являющаяся основой для построения распределенных бортовых систем КА ведущих мировых космических агентств. На сегодняшний день в отечественной космической отрасли происходит постепенное внедрение SpaceWire.

Основными задачами, ставящимися в процессе создания систем на базе SpaceWire, являются разработка инфраструктуры системы и принципов информационного взаимодействия. Для построенной системы должен обеспечиваться ряд требований, среди которых основным является соответствие значений характеристик информационных потоков заданным уровням. Дополнительно на ранних этапах разработки в качестве задач могут быть выделены различные исследовательские работы, типовым направлением которых является исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

В сложившейся мировой практике для решения обозначенных задач применяются моделирование. Существует ряд технических решений, позволяющих осуществлять моделирование работы систем на базе SpaceWire и обладающих различными техническими и функциональными

характеристиками. В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire на отечественных КА, возникает необходимость проведения исследований по проектированию и разработке подобного технического решения – комплекса моделирования работы систем на базе SpaceWire, который помимо типового функционала характерного для данных разработок, позволял бы учитывать особенности информационного взаимодействия бортовой аппаратуры перспективных автоматических отечественных КА.

Степень разработанности темы. Среди зарубежных организаций, внесших наиболее значимый вклад в разработку технических решений, обеспечивающих моделирование работы систем на базе SpaceWire, могут быть выделены: STAR-Dundee, 4Links, TELETEL S.A., German Aerospace Center, Thales Alenia Space, University of Pisa, Sandia National Laboratories, Mirabilis Design, Adam Mickiewicz University. Среди отечественных организаций выделяются: АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» и Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Зарубежные инженеры и ученые, работы и исследования которых обеспечили развитие рассматриваемой тематики: S. Parkes, S. Mills, C. McClements, B. Dellandrea, D. Jameux, A. Leoni, L. Fanucci, N. Pogkas, V. Kollias, G. Peter, W. Holubowicz, K. Romanowski, I. Odagi, H. Namikoshi, B. Van Leeuwen и др. Среди отечественных инженеров и ученых выделяются: Ю.Е. Шейнин, Е.А. Суворова, В.Л. Оленев, И.Л. Коробков и др.

На сегодняшний день сформировалось два вида моделирования работы систем на базе SpaceWire в зависимости от способа представления реального объекта – имитационное и аппаратно-программное. В области имитационного моделирования применяются технические решения, позволяющие строить системы на базе SpaceWire на основе виртуальных моделей элементов данных систем, после чего запускать процесс моделирования, по результатам которого выдается необходимая отчетная

информация. В области аппаратно-программного моделирования применяются технические решения, строящиеся на основе специализированного оборудования, представленного интерфейсными мостами, лабораторными маршрутизирующими коммутаторами и анализаторами.

Целью диссертационной работы является повышение точности вычислений характеристик информационных потоков в процессе разработки распределенных бортовых систем на базе SpaceWire.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1) Рассмотрение процесса создания распределенных бортовых систем на базе SpaceWire с применением средств моделирования. Формулировка требований к комплексу моделирования работы систем на базе SpaceWire.

2) Обзор существующих технических решений, позволяющих осуществлять моделирование работы систем на базе SpaceWire, и проведение их анализа на предмет соответствия сформулированным требованиям.

3) Исследования по проектированию и разработке структуры и алгоритмов функционирования комплекса моделирования работы систем на базе SpaceWire.

4) Экспериментальная отработка комплекса моделирования работы систем на базе SpaceWire и сравнение полученных результатов с результатами аналогов.

Область исследований соответствует п. 4, 17 паспорта научной специальности 2.3.1: «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:

1) Разработан новый алгоритм передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков для применения в процессе моделирования работы систем на базе SpaceWire, позволяющий решать

задачу по обработке информации о функционировании бортовой аппаратуры отечественных КА, отличающийся от известных возможностью установки относительных задержек и блокировок передачи данных из состава каждого информационного потока, обладающего взаимосвязью с прочими информационными потоками, а также возможностью повторной передачи данных из состава групп взаимосвязанных информационных потоков с конфигурацией таймера повтора и максимального числа передач.

2) Разработан новый алгоритм оценки искажений в передаваемых данных для применения в процессе моделирования работы систем на базе SpaceWire, позволяющий решать задачу по обработке информации об условиях функционирования распределенных бортовых систем КА в отношении воздействия заряженных частиц космического пространства на передаваемые данные, отличающийся от известных возможностью учета маршрута следования данных, состоящего из элементов, обладающих разной устойчивостью к влиянию различных типов заряженных частиц.

3) Разработана новая методика исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов в системах на базе SpaceWire, предназначенная для проведения прикладных статистических исследований, направленных на анализ функционирования данных систем в условиях изменения параметров информационного взаимодействия, отличающаяся от известных возможностью проведения ряда итераций моделирования с последующей обработкой результатов с помощью метода корреляционно-регрессионного анализа.

Теоретическая значимость работы состоит в расширении существующих подходов к обработке информации о функционировании распределенных бортовых систем на базе SpaceWire перспективных автоматических КА для проведения моделирования их работы. Кроме того, обеспечивается развитие способов проведения прикладных статистических исследований в области применения технологии SpaceWire.

Практическая значимость работы заключается в разработке комплекса моделирования, областью применения которого является проектирование, разработка и испытания распределенных бортовых систем на базе SpaceWire на предприятиях космической отрасли. Разработанный комплекс моделирования используется АО «РЕШЕТНЁВ» при формировании рекомендаций по базовым алгоритмам тестирования систем на базе SpaceWire и их отдельных элементов. Кроме того, комплекс моделирования используется «СибГУ им. М.Ф. Решетнева» при подготовке материалов для дисциплины «Технологии информационного взаимодействия радиоэлектронных систем».

Методы исследования. В диссертационном исследовании применяются методы системного анализа, теории моделирования сложных технических систем, теории алгоритмов, теории вероятностей, математической статистики и теории планирования эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту.

1) Алгоритм передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков для применения в процессе моделирования работы систем на базе SpaceWire обеспечивает соответствие функционирования модели системы правилам, регламентируемым протоколами, применяемыми для организации информационного взаимодействия бортовой аппаратуры отечественных КА.

2) Алгоритм оценки искажений в передаваемых данных для применения в процессе моделирования работы систем на базе SpaceWire обеспечивает имитацию влияния факторов космического пространства на работу собранной модели системы, является основой для расчета такой характеристики информационных потоков как вероятность доставки данных без искажений, на основании которой в дальнейшем принимаются решения об использовании механизмов обеспечения надежной доставки данных.

3) Методика исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов в системах на базе

SpaceWire предоставляет возможность косвенного определения и прогнозирования значений характеристик информационных потоков при изменении уровня выбранного фактора в условиях наличия корреляционной зависимости и линейности функции регрессии.

4) Комплекс программного обеспечения, построенный на основе разработанных алгоритмов, предоставляет возможность задания необходимых конфигураций для проведения моделирования работы систем на базе SpaceWire отечественных КА, позволяет вычислять значения характеристик информационных потоков.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность положений, выносимых на защиту, обеспечивается непротиворечивостью результатов экспериментальной отработки разработанного комплекса моделирования известным данным, низкой относительной погрешностью значений, полученных в ходе применения разработанного комплекса моделирования.

Основные результаты исследования представлялись на следующих конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Испытания, диагностика, надёжность. Теория и практика», г. Красноярск (2022); Всероссийская научная конференция с международным участием «Молодежь, наука, творчество», г. Красноярск (2022); Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения», г. Красноярск (2022); Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск (2023); Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», г. Москва (2024).

Публикации. По теме исследования опубликовано 12 работ (3 – без соавторов), в том числе 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в сборниках материалов научных конференций. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1, 2, 3, 7] – разработка алгоритмов автономного тестирования; [4, 11] – разработка программного обеспечения для проведения

анализа информационного взаимодействия; [5, 10] – разработка структуры комплекса моделирования; [6] – разработка алгоритма исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание изложено на 189 страницах. Список литературы включает 107 наименований.

1. Технология SpaceWire в отечественной космической отрасли.

Распределенная бортовая система КА обеспечивает выполнение задачи по передаче данных бортовой аппаратуры, входящей в состав платформы и полезной нагрузки. В настоящее время в отечественной космической отрасли наблюдается постепенное внедрение систем, построенных на основе технологии SpaceWire. В сравнении с ранее применяемыми технологиями, обеспечивающими передачу данных на отечественных КА, данная технология обладает существенными отличиями, из чего следует, что для решения задач, ставящихся в процессе создания систем на базе SpaceWire, должны применяться новые технические решения.

1.1. Общие сведения о технологии SpaceWire.

SpaceWire – технология информационного взаимодействия, предназначенная для обеспечения связи бортовой аппаратуры КА. Основные положения, связанные с технологией закреплены в соответствующем стандарте. Передача данных в системах на базе SpaceWire организуется с применением специализированных транспортных протоколов.

1.1.1. Разработка и развитие технологии SpaceWire.

Для организации информационного взаимодействия бортовой аппаратуры из состава КА разрабатываются специализированные технологии. В отличие от технологий, применяемых в других сферах деятельности человека, космические технологии должны отвечать более высоким уровням надежности, отказоустойчивости, сохраняемости и т.д [1].

Изначально передача данных бортовой аппаратурой из состава КА организовывалась с применением множества уникальных интерфейсов, для каждого из которых разрабатывались собственные протоколы. Подобный подход к построению распределенных бортовых систем приводил к общему усложнению организации процесса передачи данных бортовой аппаратуры.

Значимым шагом в развитии технологий обеспечения передачи данных на борту КА стала разработка Министерством обороны США стандарта MIL-STD-1553B [2] в 1978 году. На его основе в отечественной космической

отрасли был внедрен мультиплексный канал информационного обмена (МКИО). Он был принят в СССР в 1987 г. как ГОСТ 26765.52-87, а в России как ГОСТ Р 52070-2003, получив название: «Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей» [3]. Данный стандарт до сих пор является основой построения распределенных бортовых систем отечественных КА, несмотря на растущие потребности увеличения скорости передачи и обработки данных, уменьшения энергопотребления и т.д [4].

В зарубежной космической технике следующим важным шагом в направлении развития технологий информационного взаимодействия на борту КА стала разработка технологии SpaceWire. В 2003 г. Европейской ассоциацией по стандартизации в области космической техники (ECSS) была принята первая версия стандарта SpaceWire – ECSS-E-50-12A [5]. Впоследствии стандарт подвергся ревизиям. Актуальная на сегодняшний день версия стандарта ECSS-E-ST-50-12C Rev. 1 [6] была принята в 2019 г. В отечественной космической отрасли стандарт был принят в 2022 г. как ГОСТ Р 70020-2022 «Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов» [7].

Технология SpaceWire была принята как базовая технология информационного взаимодействия на борту КА Европейским космическим агентством (ESA), Американским аэрокосмическим агентством (NASA), Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA). На сегодняшний день она была применена в более чем 150 миссиях [8], среди которых могут быть выделены:

– «Lunar Reconnaissance Orbiter» (LRO) – миссия NASA, целевой задачей которой является получение изображений и других научных данных о лунной поверхности. Технология SpaceWire используется для подключения камер к системе управления и обработки данных [9];

– «ExoMars» – миссия ESA на Марс, в состав которой входит универсальный марсоход, целевой задачей которого является проведение

исследований в области геологии. «ЕхoMars» оснащен несколькими камерами, обеспечивающими обзор вокруг марсохода. SpaceWire используется для передачи изображений с камер в массовую память [10];

– «VeriColombo» – совместная миссия ESA и JAXA, целью которой является исследование Меркурия. «VeriColombo» использует SpaceWire для отправки и последующей обработки бортовым компьютером данных со своих научных полезных нагрузок (ПН) [11];

– «Solar Orbiter» – миссия ESA, цель которой направлена на изучение фундаментальных вопросов, касающихся взаимодействия Солнца с гелиосферой. SpaceWire выбран в качестве единственного интерфейса между подсистемой обработки данных КА и каждым отдельным прибором [12];

– «Jupiter Icy Moons Explorer» (JUICE) – миссия ESA по исследованию системы Юпитера, особое внимание в которой уделяется покрытым льдами спутникам. Приборы на борту JUICE подключены через систему на базе SpaceWire, которая позволяет передавать научные данные в бортовую память [13].

1.1.2. Ключевые положения стандарта SpaceWire.

Технология SpaceWire регламентирует правила работы распределенной бортовой системы и ее элементов на шести иерархически связанных уровнях, выделенных в стандарте. Общее содержание каждого из уровней представлено в таблице 1 [14].

Таблица 1 – Общее содержание каждого из уровней стандарта SpaceWire

| Уровень | Содержание |
|--------------------|--|
| Сетевой уровень | Базовые концепции построения бортовой распределенной системы и принципы работы маршрутизирующих коммутаторов |
| Пакетный уровень | Формат пакетов |
| Уровень обмена | Диаграмма состояний, управление потоком данных и распространение системного времени |
| Символьный уровень | Символы данных и символы управления |
| Сигнальный уровень | Низковольтная дифференциальная передача сигналов, кодирование сигналов и скорость передачи данных |
| Физический уровень | Кабели, разъемы и кабельные сборки |

Уровни стандарта SpaceWire можно условно сопоставить с уровнями эталонной модели взаимодействия открытых систем OSI [15]. Данное сопоставление иллюстрирует рисунок 1.

Уровни модели OSI Уровни стандарта SpaceWire

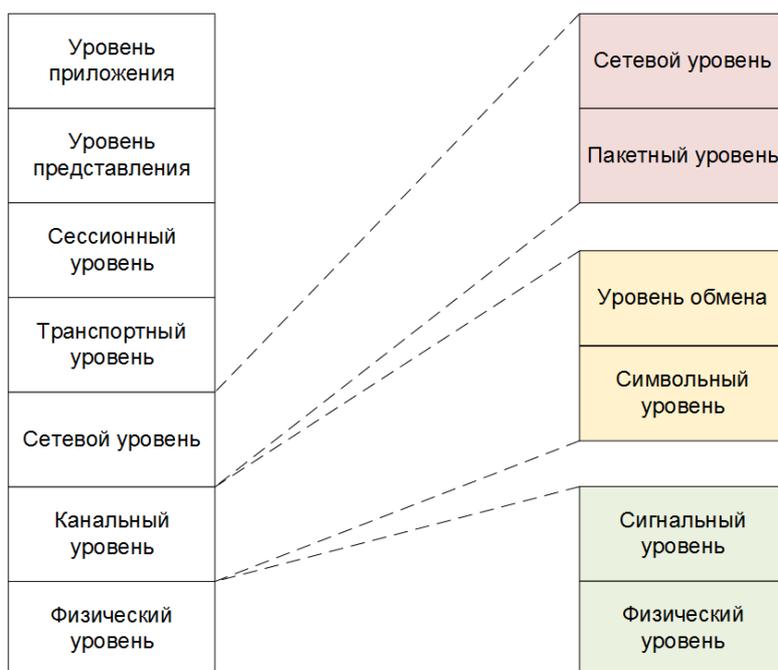


Рисунок 1 – Сопоставление уровней модели OSI с уровнями стандарта SpaceWire

Элементами систем на базе SpaceWire являются оконечные узлы, маршрутизирующие коммутаторы и кабели. Оконечные узлы представляют собой устройства, которые осуществляют передачу и прием данных. Маршрутизирующие коммутаторы, представляют собой устройства, которые предоставляют возможность формирования различных инфраструктур систем, по которым впоследствии передаются данные. Кабели SpaceWire обеспечивают непосредственный физический контакт оконечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов [16]. Пример структурной схемы системы на базе SpaceWire представлен на рисунке 2.

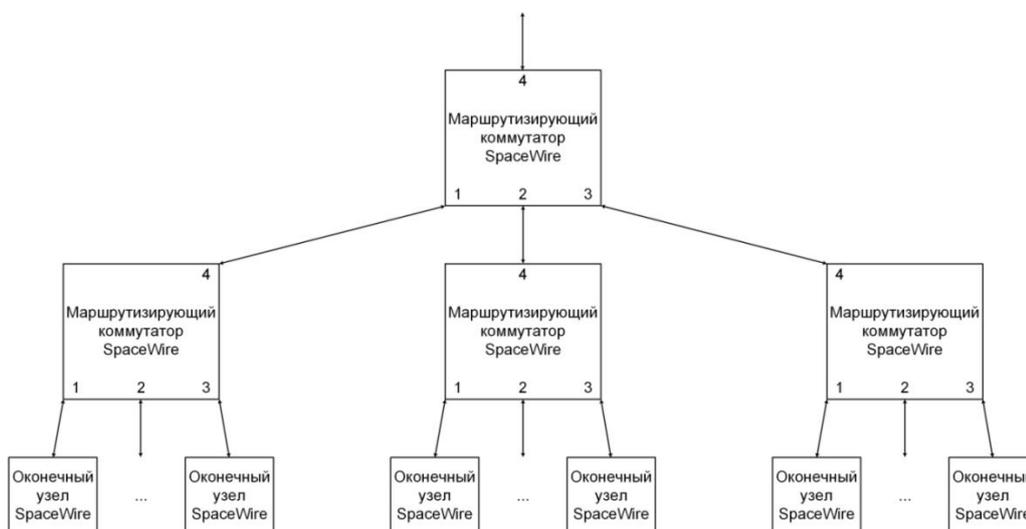


Рисунок 2 – Пример структурной схемы системы на базе SpaceWire

Передача данных в системе на базе SpaceWire осуществляется в составе пакетов, состоящих из заголовка, данных и символа конца пакета (EOP или EEP). Данный процесс осуществляется в соответствии с механизмом червячной маршрутизации. При прибытии пакета на входной порт маршрутизирующего коммутатора для него в соответствии с адресом назначения определяется выходной порт. В случае если в этот момент выходной порт свободен, то пакет передается на него. Однако если требуемый выходной порт занят передачей другого пакета, то пришедший пакет должен ожидать в приемном буфере входного порта, пока требуемый выходной порт не освободится. В случае, когда два и более входных порта ожидают освобождения одного выходного порта, маршрутизирующий коммутатор должен осуществить выбор одного из них на основе реализованного механизма арбитража [17].

Следует также отметить закрепленный в стандарте механизм групповой адаптивной маршрутизации (ГАМ). С помощью данного механизма пакет может быть доставлен от узла передатчика к узлу приемнику по различным маршрутам, выбор которых осуществляется на основании заданных конфигураций маршрутизирующих коммутаторов, а также текущей загруженности каналов передачи данных [18].

1.1.3. Транспортные протоколы, работающие совместно со SpaceWire.

Технология SpaceWire не охватывает транспортного уровня. С течением времени было разработано множество специализированных транспортных протоколов, позволяющих дополнять функционал технологии SpaceWire для обеспечения выполнения различных требований организации информационного взаимодействия в распределенных бортовых системах. Протоколы имеют собственные идентификаторы, которые определяются стандартом ECSS-E-ST-50-51C [19]. Наиболее актуальными для отечественной космической отрасли являются транспортные протоколы «Remote memory access protocol» (RMAP) и «Сетевой транспортный протокол сети SpaceWire для КА АО «ИСС» (СТП-ИСС):

1) Наиболее широко используемый транспортный протокол, разработанный для технологии SpaceWire – RMAP. Протокол предоставляет механизм управления и конфигурации устройств, имеющих в своем составе интерфейс SpaceWire. Основой работы механизма является работа с памятью целевого узла, осуществляемая узлом инициатором [20]. Транспортный протокол RMAP предоставляет три типа команд:

– запись. Данная команда позволяет узлу инициатору записать некоторый объем данных в область памяти целевого узла;

– чтение. Данная команда позволяет узлу инициатору считать некоторый объем данных из области памяти целевого узла. Считанные данные возвращаются в ответном пакете;

– чтение-изменение-запись. Данная команда позволяет узлу инициатору считать некоторый объем данных из области памяти целевого узла и затем записать в эту область другие данные. Считанные данные возвращаются в ответном пакете.

Важнейшим полем в структуре команды RMAP является поле инструкции, позволяющее однозначно определить ряд параметров, влияющих на ход выполнения команды:

– тип команды (запись / чтение);

– требование верификации перед записью. Для команды записи может быть установлено требование верификации, которое позволяет целевому узлу осуществить дополнительный ряд проверок команды перед непосредственной записью данных, содержащихся в команде;

– требование ответа. Для команды может быть установлено требование ответа, которое позволяет целевому узлу выполнить отправку ответа на команду узлу инициатору, в котором будет содержаться статус выполнения команды, а также запрашиваемые данные в случае, если типом исходной команды было чтение;

– требование инкрементирования адреса памяти. Для команды может быть установлено требование инкрементирования адреса памяти, которое позволяет применить команду не к одной ячейке указанной области памяти целевого узла, а к ряду последовательных ячеек.

Актуальная версия стандарта транспортного протокола RMAP – ECSS-E-ST-50-52C была принята в 2010 году [21].

2) Отечественная разработка транспортного протокола для технологии SpaceWire – СТП-ИСС. Протокол определяет правила передачи данных между оконечными узлами в системах на базе SpaceWire [22]. Кроме того, СТП-ИСС предоставляет ряд механизмов обеспечения качества сервиса:

– приоритеты и арбитраж информационных потоков. Пакетам различного типа присваиваются различные уровни приоритета. Данный механизм позволяет проводить арбитраж при обработке заявок на передачу пакетов с различными уровнями приоритета;

– негарантированная доставка данных. Обеспечивается передача пакетов без подтверждения. Данный механизм позволяет организовывать быструю, но ненадежную передачу данных;

– гарантированная доставка данных. Обеспечивается передача пакетов с запросом на отправку пакетов подтверждений. Данный механизм позволяет повторно отправлять пакеты в случае, если они не достигли узла назначения.

Для обеспечения корректной работы данного механизма на передающей стороне используется таймер повтора;

– планирование. Передача пакетов осуществляется в соответствии с расписанием. Данный механизм позволяет организовать детерминированную передачу данных [23].

Важнейшими полями в структуре пакета СТП-ИСС является поля флагов, позволяющее однозначно определить ряд параметров, влияющих на передачу пакета:

– признак версии. На сегодняшний день определены две версии протокола, отличающихся набором функциональных характеристик: СТП-ИСС-13 и СТП-ИСС-14;

– тип пакета. Последней версией протокола определены десять различных типов пакетов, каждый из которых имеет специфичное назначение. Наиболее широко применяемыми типами пакетов являются: пакет команды управления, пакет срочного сообщения, пакет обычного сообщения и пакет подтверждения;

– признак вторичного заголовка. Для пакета может быть задан вторичный заголовок в случае, если он является сегментом некоторого более крупного блока данных. Сегментация блока данных осуществляется приложением узла передатчика в случае, если его размер превышает предельное значение в соответствии с протоколом (2 Кбайт для СТП-ИСС-13 и 64 Кбайт для СТП-ИСС-14);

– требование подтверждения приема. Для пакета может быть установлено требование подтверждения приема, которое позволяет узлу приемнику выполнить отправку пакета подтверждения при получении пакета от узла передатчика. Требование задается в случае работы механизма гарантированной доставки данных.

1.2. Процесс создания распределенных бортовых систем на основе технологии SpaceWire.

В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire в

отечественной космической отрасли возникает проблема, связанная с обеспечением решения задач, ставящихся в процессе создании распределенных бортовых систем, построенных на основе данной технологии. Выполнение данных задач является невозможным без применения новых специализированных технических решений.

1.2.1. Основные задачи, ставящиеся в процессе создания систем на базе SpaceWire.

Как отмечалось ранее, система на базе SpaceWire состоит из ряда элементов – конечных узлов, маршрутизирующих коммутаторов и кабелей. Процесс их создания осуществляется поэтапно в соответствии с тем или иным нормативным документом. Основной опорой процесса на каждом из этапов является обеспечение соответствия данных элементов требованиям стандарта SpaceWire и прочим предъявляемым к ним требованиям как к бортовой аппаратуре из состава КА. Параллельно с процессом создания отдельных элементов стартует процесс создания самой системы.

Исходными данными для создания системы на базе SpaceWire является состав и логика функционирования бортовой аппаратуры. С учетом данной информации проводится проектирование системы, в ходе которого решается ряд задач, среди которых основными являются:

1) Разработка инфраструктуры системы, предполагающая задание необходимого количества элементов системы и построение взаимосвязей между ними. Кроме того, осуществляется выбор схем резервирования, обеспечивающих требуемый уровень надежности передачи информации между конечными узлами. В ходе разработки инфраструктуры системы может быть приведено несколько вариантов ее реализации, из которых в дальнейшем выбирается наилучший. Варианты могут отличаться организацией взаимосвязей элементов системы между собой, количеством маршрутизирующих коммутаторов, схемами резервирования и т.д.

2) Разработка принципов информационного взаимодействия, предполагающая задание ряда конфигураций для обеспечения корректной

работы как всей системы, так и ее отдельных элементов. Для окончательных узлов определяются информационные потоки и их конфигурационные параметры, такие как объем передаваемых данных, период передачи данных, используемый транспортный протокол и его механизмы и т.д. Для маршрутизирующих коммутаторов определяется необходимость использования механизмов арбитража, группового вещания, ГАМ. Кроме того, определяется скорость передачи данных для всех элементов системы.

После разработки инфраструктуры системы и принципов информационного взаимодействия должны быть получены значения характеристик информационных потоков и проведен анализ их соответствия предъявляемым требованиям. В случае если требования не выполняются, то должны проводиться необходимые уточнения. Таким образом, процесс создания системы на базе SpaceWire описывается алгоритмом, блок-схема которого представлена на рисунке 3.

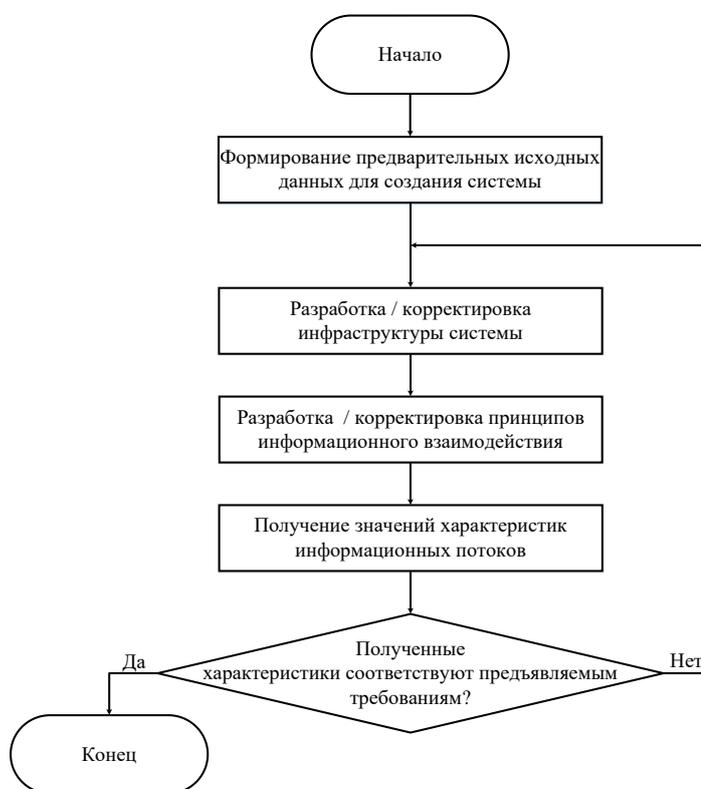


Рисунок 3 – Блок схема алгоритма процесса создания системы на базе SpaceWire

1.2.2. Исследовательские задачи, ставящиеся в процессе создания систем на базе SpaceWire.

На начальных этапах создания систем на базе SpaceWire также допускается проведение различных исследовательских работ, что способствует дальнейшему процессу их развития. Наиболее распространенным направлением исследований в области информационного взаимодействия в системах на базе SpaceWire является поиск зависимостей характеристик информационных потоков от различных факторов. Данная задача является типовой, подтверждением чему служит то, что за время существования технологии было проведено множество подобных исследований, часть из которых приводится в виде краткого описания в данном разделе:

– в ходе оценки производительности работы различных инфраструктур систем на базе SpaceWire проводились исследования влияния различных наборов конфигураций, включающих в себя применение нестандартного механизма чередования символов N-Char, применение механизма арбитража, использование виртуальных каналов, на задержки передачи данных [24];

– в ходе оценки эффективности работы систем на базе SpaceWire и распределения ресурсов в условиях высокой загрузки одного или нескольких оконечных узлов («Hot Modules») проводились исследования влияния применения механизма арбитража и регулирования работы механизма кредитования на задержки передачи данных [25];

– в ходе оценки производительности драйвера VxWorks для платы SpaceWire-cPCI проводились исследования зависимости скорости передачи данных от объема передаваемых данных [26];

– в ходе сопоставления различных методов составления оптимальных таблиц расписаний для работы механизма планирования в системах на базе SpaceWire проводились исследования зависимости пропускной способности от количества коммутаторов, оконечных узлов и информационных потоков [27];

– в ходе моделирования работы маршрутизирующего коммутатора с целью выявления наилучшей схемы организации механизма арбитража (из трех рассматриваемых) проводились исследования зависимости задержки передачи данных из состава информационного потока одного оконечного узла от объема передаваемых данных из состава информационного потока другого оконечного узла (возникновение блокировки) [28];

– в ходе проверки функционирования маршрутизирующего коммутатора с реализованным механизмом неблокирующей передачи данных проводились исследования зависимости задержки передачи данных в канале с маршрутизирующим коммутатором от объема передаваемых данных в блокирующем и неблокирующем режимах [29];

– в ходе оценки производительности работы протокола SpaceWire-R проводился ряд исследований зависимости пропускной способности и задержек передачи данных от объема передаваемых данных при различных значениях других параметров: скорость передачи данных, длина сегмента данных, размер скользящего окна [30];

– в ходе оценки производительности работы специализированного оборудования SpaceWire GbE Brick и прочих интерфейсных мостов компании STAR-Dundee проводились исследования зависимости среднего уровня задержек передачи данных и пропускной способности от объема передаваемых данных [31].

1.2.3. Применение моделирования для поддержки процесса создания систем на базе SpaceWire.

Следует отметить, что при создании бортовых распределенных систем на основе технологии SpaceWire должно предусматриваться применение прогрессивных методов проектирования, изготовления и испытаний. В сложившейся мировой практике одним из наиболее широко применяемых методов является моделирование – замещение реального объекта его моделью с целью получения информации о данном объекте, с помощью проведения экспериментов с его моделью.

Моделирование представляет собой важный инструмент, применяемый в процессе создания систем на базе SpaceWire, т.к. с его помощью предоставляется ряд преимуществ:

- обеспечивается старт процесса отработки принятых решений (инфраструктура системы, принципы информационного взаимодействия) до непосредственного изготовления элементов системы, что приводит к сокращению затрат времени на ее создание;

- обеспечивается исключение большинства ошибок, связанных с отработкой принятых решений на поздних этапах создания системы (например, при проведении испытаний с реальной системой);

- обеспечивается проведение исследований принятых решений, которые являются трудновоспроизводимыми при работе с реальными системами.

Процесс моделирования может осуществляться только в том случае, если доступна информация или выдвинуты гипотезы о структуре, параметрах и алгоритмах функционирования объекта моделирования, представляющего собой некоторую реальную распределенную бортовую систему на основе технологии SpaceWire. Характерным свойством корректно построенной модели является то, что она позволяет исследовать только необходимые закономерности работы объекта, поэтому объект и модель должны быть сходны по ряду одних признаков и могут отличаться всем остальным [32].

Поскольку система на базе SpaceWire состоит из множества взаимосвязанных элементов, то ее модель также строится на основе совокупности элементов – моделей конечных узлов, маршрутизирующих коммутаторов и кабелей. Каждый тип модели функционирует в соответствии с заложенным для него алгоритмом и обладает своими конфигурационными параметрами.

Моделирование работы систем на базе SpaceWire осуществляется с помощью применения средств специализированных технических решений – комплексов моделирования.

В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire в отечественной космической отрасли необходимым является наличие комплекса моделирования, обеспечивающего поддержку процесса создания систем, построенных на основе данной технологии, для перспективных автоматических отечественных КА. Для рассматриваемого комплекса моделирования должен быть сформулирован ряд требований, основным из которых является возможность проведения рассмотренных ранее работ – разработки инфраструктуры системы и принципов информационного взаимодействия с последующим получением значений характеристик информационных потоков и проведением анализа их соответствия предъявляемым требованиям. Также важна потенциальная возможность проведения исследований зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов на начальных этапах создания системы.

1.3. Требования к комплексу моделирования работы систем на базе SpaceWire.

На начальном этапе формулировки требований, предъявляемых к комплексу моделирования, необходимо провести сбор и обработку информации о потенциальном объекте моделирования – распределенной бортовой системе на базе SpaceWire перспективного автоматического отечественного КА.

1.3.1. Получение информации об объекте моделирования.

Применение технологии SpaceWire планируется на ряде перспективных автоматических отечественных КА, среди которых выделяется один для дальнейшего рассмотрения. С помощью средств SpaceWire на данном КА организуется система, состоящая из восьми оконечных узлов (четыре оконечных узла представляют резервные комплекты), соединенными между собой четырьмя маршрутизирующими коммутаторами. На рисунке 4 представлена структура обозначенной системы.

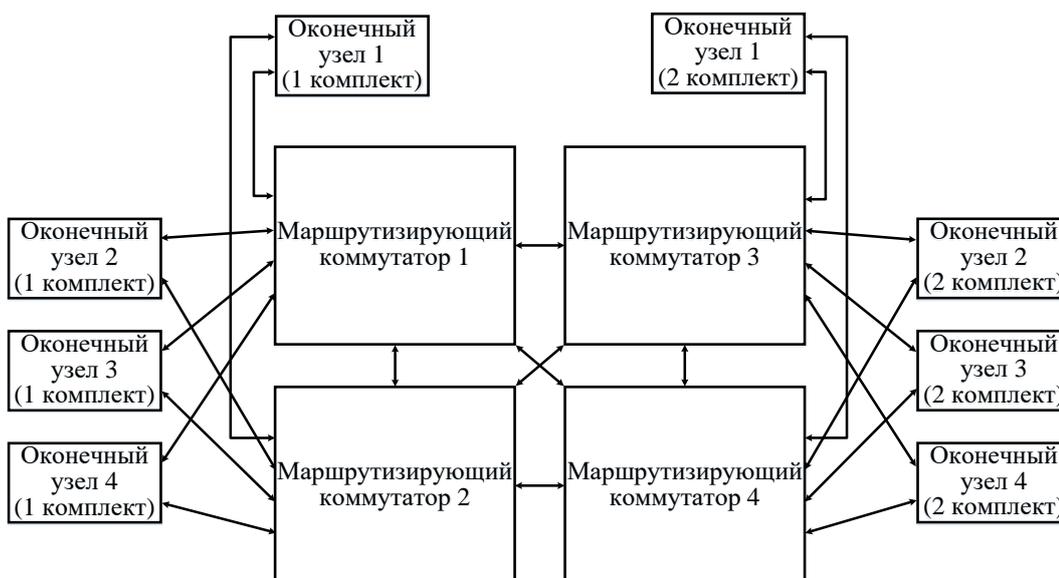


Рисунок 4 – Структура системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА

Передача данных в представленной системе осуществляется в соответствии со специализированными протоколами информационного взаимодействия. Положениями протоколов определяются объемы передаваемых данных из состава информационных потоков, а также два условия передачи данных, заключающихся в циклической передаче данных и в передаче данных по запросу (с наземного комплекса управления (НКУ)).

Применяется транспортный протокол RMAP:

- команды записи с требованием ответа;
- команды чтения.

Протоколами предусмотрено правило, согласно которому осуществляется повторная передача данных из состава информационных потоков в случае возникновения ошибок – максимальное количество передач равняется двум. Правило действует, если не определены другие правила.

В соответствии с одним из протоколов определено шесть режимов информационного взаимодействия, в которых функционируют различные информационные потоки.

а) В первом режиме функционируют информационные потоки, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Информационные потоки, функционирующие в первом режиме

| Номер | Назначение | Объем передаваемых данных | Условие передачи данных | Тип команды |
|--|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 2 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 250 байт | Период 500 мс | Запись |
| 2 | Информационный поток 2 | 50 байт | Период 25 мс | |
| 3 | Информационный поток 3 | 500 байт | Период 500 мс | Чтение |
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 3 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 250 байт | Период 500 мс | Запись |
| 2 | Информационный поток 2 | 500 байт | Период 500 мс | Чтение |

Часть из представленных информационных потоков являются взаимосвязанными. Для пары конечных узлов 1 и 2 передача данных из состава информационного потока 3 происходит спустя 50 мс после передачи данных из состава информационного потока 1 (вне зависимости от наличия ошибок). В случае если в ходе передачи данных из состава какого-либо из обозначенных информационных потоков происходит ошибка, то весь процесс описанного информационного взаимодействия повторяется (максимальное количество передач равняется двум). Для пары конечных узлов 1 и 3 аналогично связаны информационные потоки 2 и 1.

б) Во втором режиме функционируют информационные потоки, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Информационные потоки, функционирующие во втором режиме

| Номер | Назначение | Объем передаваемых данных, | Условие передачи данных | Тип команды |
|--|------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------|
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 2 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 100 байт | По запросу | Запись |
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 3 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 100 байт | По запросу | Запись |

в) В третьем режиме функционируют информационные потоки, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Информационные потоки, функционирующие в третьем режиме

| Номер | Назначение | Объем передаваемых данных | Условие передачи данных | Тип команды |
|--|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 2 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 500 байт | Период 250 мс | Чтение |
| 2 | Информационный поток 2 | 500 байт | Период 250 мс | |
| 3 | Информационный поток 3 | 500 байт | Период 250 мс | |
| 4 | Информационный поток 4 | 500 байт | Период 250 мс | |
| 5 | Информационный поток 5 | 500 байт | Период 250 мс | |
| 6 | Информационный поток 6 | 500 байт | Период 250 мс | |
| 7 | Информационный поток 7 | 500 байт | Период 250 мс | |
| 8 | Информационный поток 8 | 500 байт | Период 250 мс | |
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 3 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 500 байт | Период 250 мс | Чтение |
| 2 | Информационный поток 2 | 500 байт | Период 250 мс | |

г) В четвертом режиме функционируют информационные потоки, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Информационные потоки, функционирующие в четвертом режиме

| Номер | Назначение | Объем передаваемых данных | Условие передачи данных | Тип команды |
|--|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 2 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 100 байт | По запросу | Чтение |
| 2 | Информационный поток 2 | 2000 байт | По запросу | |
| 3 | Информационный поток 3 | 2000 байт | По запросу | |
| 4 | Информационный поток 4 | 2000 байт | По запросу | |
| 5 | Информационный поток 5 | 2000 байт | По запросу | |
| 6 | Информационный поток 6 | 2000 байт | По запросу | |
| 7 | Информационный поток 7 | 2000 байт | По запросу | |
| 8 | Информационный поток 8 | 2000 байт | По запросу | |
| 9 | Информационный поток 9 | 2000 байт | По запросу | |
| 10 | Информационный поток 10 | 2000 байт | По запросу | |
| 11 | Информационный поток 11 | 1000 байт | По запросу | |
| 12 | Информационный поток 12 | 2000 байт | По запросу | |
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 3 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 2000 байт | По запросу | Чтение |
| 2 | Информационный поток 2 | 2000 байт | По запросу | |
| 3 | Информационный поток 3 | 2000 байт | По запросу | |
| 4 | Информационный поток 4 | 2000 байт | По запросу | |
| 5 | Информационный поток 5 | 2000 байт | По запросу | |

д) В пятом режиме функционируют информационные потоки, представленные в таблице 6.

Таблица 6 – Информационные потоки, функционирующие в пятом режиме

| Номер | Назначение | Объем передаваемых данных | Условие передачи данных | Тип команды |
|--|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 2 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 300 байт | По запросу | Запись |
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 3 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 300 байт | По запросу | Запись |

е) В шестом режиме функционируют информационные потоки, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – Информационные потоки, функционирующие в шестом режиме

| Номер | Назначение | Объем передаваемых данных | Условие передачи данных | Тип команды |
|--|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| Оконечный узел 1 → Оконечный узел 2 | | | | |
| 1 | Информационный поток 1 | 100 байт | По запросу | Запись |
| 2 | Информационный поток 2 | 500 байт | По запросу | Чтение |
| 3 | Информационный поток 3 | 1000 байт | По запросу | |
| 4 | Информационный поток 4 | 300 байт | По запросу | |

Часть из представленных информационных потоков являются взаимосвязанными:

– передача данных из состава информационного потока 3 происходит последовательно и без задержек за передачей данных из состава информационного потока 2 (вне зависимости от наличия ошибок), после чего спустя 20 мс происходит передача данных из состава информационного потока 1 (только при отсутствии ошибок). В случае если в ходе передачи данных из состава какого-либо из обозначенных информационных потоков происходит ошибка, то весь процесс описанного информационного взаимодействия повторяется спустя 40 мс (максимальное количество передач равняется четырем).

– передача данных из состава информационного потока 3 происходит последовательно и без задержек за передачей данных из состава информационного потока 4 (вне зависимости от наличия ошибок). В случае

если в ходе передачи данных из состава какого-либо из обозначенных информационных потоков происходит ошибка, то весь процесс описанного информационного взаимодействия повторяется (максимальное количество передач равняется двум).

В соответствии с другим протоколом, разработанным для данной сети, определено шесть режимов информационного взаимодействия, в которых функционируют информационные потоки, данные из состава которых передаются между конечными узлами 1 и 4.

SpaceWire является не единственной технологией, применяемой для обеспечения информационного взаимодействия в рассматриваемой распределенной бортовой системе – аналогичную задачу выполняет МКИО. Рассмотренные режимы передачи данных для системы на базе SpaceWire дублируют аналогичные режимы передачи данных для системы на базе МКИО. Это связано с текущим этапом интеграции технологии SpaceWire на перспективных автоматических отечественных КА. Одновременный переход на более интенсивное информационное взаимодействие и на новую технологию может привести к ряду проблем – возможно возникновение множества ошибок в работе системы, определение причины которых будет затруднительным. Следовательно, отработка новой технологии начинается с тем же информационным взаимодействием, которое осуществляется в системе, построенной на основе предшествующей технологии.

1.3.2. Определение задач комплекса моделирования.

Любой комплекс моделирования разрабатывается в зависимости от поставленных задач, в качестве которых выделяется исследование отдельных сторон функционирования объекта моделирования. Задачами, ставящимися перед комплексом моделирования работы систем на базе SpaceWire, являются:

- 1) Определение значений характеристик информационных потоков.

Существует множество различных характеристик информационных потоков, однако ключевыми из них, т.е. теми, к которым в обязательном

порядке предъявляются требования, являются характеристики, относящиеся к производительности и надежности передачи данных:

а) Общие характеристики:

- задержка передачи данных;
- скорость передачи данных;
- вероятность доставки данных без искажений.

Следует также выделять аналогичные характеристики, связанные с применением транспортных протоколов RMAP и СТП-ИСС. Данные характеристики помимо прямой передачи команд или пакетов должны учитывать передачу ответных команд или пакетов подтверждения.

б) Характеристики, связанные с применением транспортного протокола RMAP:

- время выполнения команды;
- вероятность выполнения команды без искажений.

в) Характеристики, связанные с применением транспортного протокола СТП-ИСС:

- время передачи пакета и подтверждения;
- вероятность передачи пакета и подтверждения без искажений.

2) Исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

Исследуемые характеристики соответствуют характеристикам, рассмотренным выше. Факторы соответствуют параметрам информационного взаимодействия, внешним воздействиям на систему и пр. В результате проведения исследования необходимо определение, как наличия, так и характера зависимости.

1.3.3. Определение конфигурационных параметров комплекса моделирования.

Признаком корректного функционирования построенной модели является подобие процессов, проходящих в ней, процессам, проходящим в объекте моделирования. Следовательно, требуется выделение наиболее

существенных особенностей структурно-функциональной организации объекта моделирования, без учета которых невозможно получение необходимых результатов. На данном основании в соответствии с системным подходом проводится декомпозиция объекта моделирования. В процессе декомпозиции учитывается ранее полученная информация о системе на базе SpaceWire из состава отечественного КА, а также потенциальная возможность развития данной системы в части применения новых технических решений, таких как передача данных с использованием транспортного протокола СТП-ИСС. Декомпозиция осуществляется до той поры, пока на нижнем уровне иерархии не будут получены элементарные фрагменты [33]. Элементарность устанавливается на основе критерия окончания декомпозиции, для которого предлагается следующее определение: декомпозиция прекращается, когда на последнем полученном уровне детализации оказывается некоторое численное значение, являющееся исходными данными для алгоритмов функционирования объекта моделирования. В случаях, когда на основе имеющейся информации невозможно определение элементарных фрагментов, они обозначаются некоторой группой, относящейся к определенному алгоритму. Элементы системы, полученные в результате декомпозиции, представлены в виде списка.

1.3.3.1. Оконечные узлы. Каждый отдельный конечный узел должен обладать возможностью управляемого формирования информации для ее передачи и обработки информации при ее получении. Для каждого конечного узла могут быть определены:

1) Информационные потоки. Каждый отдельный информационный поток должен обеспечивать передачу данных в соответствии с положениями протоколов информационного взаимодействия (в т.ч. разработанных протоколов для системы, представленной на рисунке 4). Для каждого информационного потока могут быть определены:

а) Объем передаваемых данных. Данный элементарный фрагмент

определяет количество байт, которые передаются в одном пакете данных из состава информационного потока. Элемент не учитывает заголовок транспортного протокола – только поле данных. В случае применения команды чтения RMAP данный элемент относится к полю данных ответа на команду (команда чтения не содержит поля данных).

б) Условие передачи данных:

– период передачи данных. Данный элементарный фрагмент определяет значение времени между передачей двух пакетов данных из состава информационного потока, для которого определена циклическая передача;

– передача данных по запросу. Элементарные фрагменты, определяющие некоторый набор значений, необходимых для работы алгоритма, предназначенного для управления информационными потоками, в качестве условия передачи пакетов данных которых определена передача по запросу.

в) Задержка передачи данных. Данный элементарный фрагмент определяет значение времени между запуском процесса моделирования и стартом передачи пакетов данных из состава информационного потока.

г) Взаимосвязь информационных потоков. Элементарные фрагменты, определяющие некоторый набор значений, необходимых для работы алгоритма, предназначенного для управления информационными потоками, передача пакетов данных из состава которых связана с передачей пакетов данных из состава других информационных потоков.

д) Транспортный протокол RMAP:

– тип команды (запись, чтение, чтение-изменение-запись). Данный элементарный фрагмент определяет структуру команды, а также принципы ее обработки;

– требование ответа. Данный элементарный фрагмент определяет необходимость формирования и передачи ответа на команду;

– максимальное количество передач. Данный элементарный фрагмент определяет предельное значение количества передач команды в случае отсутствия ответа на команду;

– таймер повтора. Данный элементарный фрагмент определяет значение времени, которое проходит с момента передачи команды до ее повторной передачи в случае отсутствия ответа на команду.

Несмотря на то, что механизм повторной передачи команды не реализуется средствами транспортного протокола RMAP, он и связанные с ним элементарные фрагменты являются необходимыми, что обуславливается рассмотренными принципами функционирования системы на базе SpaceWire, выделенной в качестве объекта моделирования.

е) Транспортный протокол СТП-ИСС:

– тип пакета (команда управления, срочное сообщение, обычное сообщение). Данный элементарный фрагмент определяет структуру пакета данных, а также принципы его обработки;

– требование подтверждения приема. Данный элементарный фрагмент определяет необходимость формирования и передачи пакета подтверждения при получении пакета данных узлом приемником (негарантированная и гарантированная доставка данных);

– таймер времени жизни пакета. Данный элементарный фрагмент определяет значение времени, в течение которого пакет данных является актуальным для передачи в случае отсутствия пакета подтверждения;

– таймер повтора. Данный элементарный фрагмент определяет значение времени, которое проходит с момента передачи пакета данных до его повторной передачи в случае отсутствия пакета подтверждения.

2) Скорость передачи данных. Данный элементарный фрагмент определяет рабочую скорость передачи пакетов данных оконечных узлов.

1.3.3.2. Маршрутизирующие коммутаторы. Каждый отдельный маршрутизирующий коммутатор должен обладать возможностью получения информации на свои выходные порты, ее обработки в соответствии с

заданной таблицей маршрутизации и дальнейшей передачи с одного или нескольких выходных портов. Для каждой отдельной строки таблицы маршрутизации каждого отдельного маршрутизирующего коммутатора должна обеспечиваться возможность определения:

1) Параметры ключевых механизмов. Каждый из параметров ключевых механизмов определяет функционирование маршрутизирующего коммутатора в случае поступления пакета данных на один из его входных портов:

а) Удаление заголовка. Данный элементарный фрагмент определяет необходимость удаления первого байта адреса принятого пакета данных маршрутизирующим коммутатором;

б) Арбитраж. Данный элементарный фрагмент определяет уровень приоритета для передачи принятого пакета данных на запрашиваемый выходной порт маршрутизирующего коммутатора;

в) Мультивещание. Данный элементарный фрагмент определяет набор выходных портов маршрутизирующего коммутатора, на которые передается принятый пакет данных;

г) ГАМ. Данный элементарный фрагмент определяет необходимость передачи пакета данных только с одного выходного порта, обладающего наивысшим приоритетом среди набора портов, определенных для мультивещания.

2) Скорость передачи данных. Данный конечный элемент определяет рабочую скорость передачи пакетов данных маршрутизирующих коммутаторов.

Графическая интерпретация декомпозиции объекта моделирования, представляющего собой систему на базе SpaceWire перспективного автоматического отечественного КА представлена на рисунке 5.

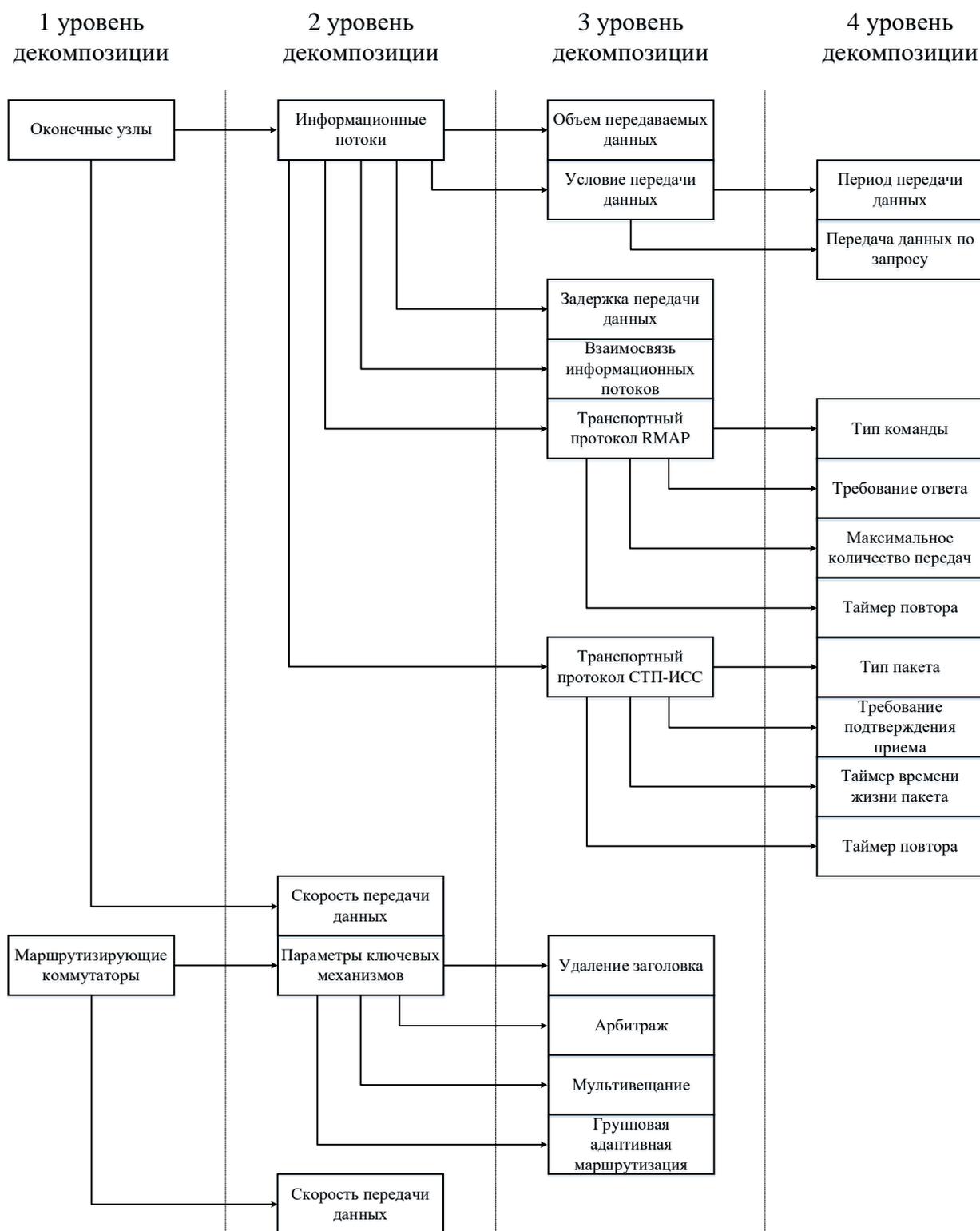


Рисунок 5 – Графическая интерпретация декомпозиции объекта моделирования

Проведенная декомпозиция объекта моделирования является основанием для определения конфигурационных параметров комплекса моделирования – с его помощью должна обеспечиваться возможность

задания всех полученных в процессе декомпозиции элементов для модели. Отмечается, однако, что при построении модели с использованием средств комплекса моделирования определение каждого из элементов должно являться допустимым, но не обязательным. Так, для организации информационного взаимодействия в системах на базе SpaceWire, как правило, используется только один транспортный протокол, следовательно, определение элементов, относящихся к другим транспортным протоколам, не является обязательным. То же в различной степени справедливо по отношению к другим элементам.

Дополнительно отмечается, что комплекс моделирования должен обеспечивать возможность задания конфигурационных параметров для воспроизведения условий функционирования распределенных бортовых систем КА в отношении искажений передаваемых данных из состава информационных потоков (имитация влияния внешних факторов на объект моделирования).

Кроме того, комплекс моделирования должен обладать возможностью задания конфигураций, относящихся к основным правилам проведения моделирования:

а) Время моделирования. Данный параметр устанавливается таким образом, чтобы обеспечивалась возможность сбора достаточного количества информации, полученной в процессе моделирования для последующего анализа. Значение определяется оператором комплекса моделирования.

б) Режим моделирования. В соответствии с задачами, ставящимися перед моделью, определяются два режима моделирования:

- определение характеристик информационных потоков;
- исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

1.4. Выводы по первой главе.

1) Рассмотрение общих сведений о технологии SpaceWire позволило получить следующую информацию:

а) Технология SpaceWire является основой для построения распределенных бортовых систем КА ведущих мировых космических агентств и была применена в более чем 150 миссиях. На сегодняшний день технология активно внедряется в отечественной космической отрасли.

б) Стандартом SpaceWire регламентируются правила работы соответствующих систем и их элементов на шести иерархически связанных уровнях. Элементами систем являются оконечные узлы, маршрутизирующие коммутаторы и кабели.

в) Существует ряд специализированных транспортных протоколов, работающих совместно со SpaceWire, среди которых в качестве наиболее актуальных для отечественной космической отрасли выделяются RMAP и СТП-ИСС. Данные транспортные протоколы реализуют необходимые функциональные характеристики для обеспечения передачи данных бортовой аппаратурой КА.

2) Рассмотрение процесса создания систем на базе SpaceWire позволило выделить следующую информацию:

а) Основными задачами, стоящими в процессе создания систем на базе SpaceWire являются разработка инфраструктуры системы и принципов информационного взаимодействия с последующим получением значений характеристик информационных потоков, которые сопоставляются с предъявляемыми требованиями.

б) На начальных этапах создания систем на базе SpaceWire допускается проведение исследовательских работ, типовым направлением которых является поиск зависимостей характеристик информационных потоков от различных факторов.

в) При решении обозначенных задач должно предусматриваться применение средств моделирования. В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire в отечественной космической отрасли существует необходимость наличия технического решения – комплекса моделирования, обеспечивающего поддержку процесса создания систем на базе SpaceWire.

3) Сформулированы требования к комплексу моделирования работы систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА:

а) В качестве типового объекта моделирования выделяется система на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА, состоящая из нескольких конечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов. Передача данных в системе осуществляется в соответствии с разработанными протоколами информационного взаимодействия, обладающими особенностями, заключающимися в наличии взаимосвязей между передачей данных из состава некоторых информационных потоков.

б) В качестве задач комплекса моделирования выделяются:

– определение характеристик информационных потоков;

– исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

в) В качестве конфигурационных параметров комплекса моделирования выделяются параметры, определенные на основании декомпозиции объекта моделирования.

2. Технические решения для моделирования работы распределенных бортовых систем на базе SpaceWire.

Моделирование работы распределенных бортовых систем на основе технологии SpaceWire осуществляется с помощью комплексов моделирования, обладающих различными функциональными и техническими характеристиками. Существует необходимость анализа данных характеристик на предмет соответствия выделенным в первой главе требованиям, предъявляемым к комплексу моделирования, предназначенному для поддержки процесса создания систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА.

На сегодняшний день на основании анализа существующих технических решений, позволяющих осуществлять моделирование работы систем на базе SpaceWire, могут быть выделены две разновидности моделирования в зависимости от способа представления реального объекта – имитационное и аппаратно-программное моделирование.

2.1. Имитационное моделирование.

Проведение имитационного моделирования, являющегося подвидом математического моделирования, заключается в процессе установления соответствия реальному объекту некоторого алгоритма, реализованного в виде программы на ЭВМ, которая в ходе своего выполнения имитирует последовательность изменений состояний объекта во времени и предоставляет сведения о его поведении [34].

Существующие технические решения в области имитационного моделирования работы систем на базе SpaceWire имеют ряд общих функциональных характеристик, среди которых выделяются:

- а) Проектирование модели системы, построенной на основе технологии SpaceWire и / или SpaceFibre [35].
- б) Проведение моделирования работы системы с дальнейшим определением характеристик информационных потоков.

в) Выявление слабых мест спроектированной системы с точки зрения устойчивости к отказам и сбоям.

Структура модели системы на базе SpaceWire, построенная с помощью какого-либо технического решения в области имитационного моделирования иллюстрируется на рисунке 6.



Рисунок 6 – Структура модели системы на базе SpaceWire, построенная с помощью какого-либо технического решения в области имитационного моделирования

Далее рассматриваются существующие технические решения в области имитационного моделирования с выделением их основных функциональных характеристик.

2.1.1. Modeling of SpaceWire Traffic.

Modeling of SpaceWire Traffic (MOST) (Thales Alenia Space) – один из первых симуляторов, предназначенных для поддержки всех этапов разработки систем, построенных на основе технологий SpaceWire и SpaceFibre, начиная от проектирования, заканчивая тестированием и прогнозированием ошибок. Актуальность разработки симулятора была обусловлена ростом сложности разрабатываемых систем – увеличением числа составляющих элементов, а также используемых механизмов.

Изначально MOST разработан на основе симулятора OPNET Modeler [36], но впоследствии перенесен на симулятор NS-3 [37].

Разработка инфраструктуры системы в MOST осуществляется с помощью графического редактора, который обеспечивает размещение двух типов элементов: конечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов. Элементы доступны для выбора в библиотеке. Это могут быть элементы без заданных конфигураций или элементы с заданными конфигурациями, которые представляют собой готовые модели реальных устройств. Библиотека может пополняться пользователем.

Каждый размещенный элемент в разработанной инфраструктуре системы может быть сконфигурирован по ряду predetermined параметров. Особенностью MOST является возможность детальной настройки каждого процесса, проходящего в элементе системы. Например, могут быть скорректированы параметры работы машины состояний.

Для конечных узлов задаются информационные потоки, конфигурируемые по таким параметрам как объем передаваемых данных, период передачи данных и пр. Допускается передача данных с использованием транспортного протокола RMAP, а в более поздних версиях симулятора поддерживаются функционал транспортного протокола СТП-ИСС [38]. Существует возможность моделирования сбойных ситуаций, регламентируемых стандартом SpaceWire (уровень обмена, сетевой уровень), при информационном взаимодействии. Дополнительно реализована опция установки предельных значений задержек передачи данных, которые впоследствии сравниваются со значениями, полученными в ходе моделирования.

Маршрутизирующие коммутаторы поддерживают механизмы удаления заголовка, арбитража, мультивещания, а также ГАМ. Конфигурация таблицы маршрутизации для каждого маршрутизирующего коммутатора может осуществляться как в статическом режиме (до непосредственного запуска

процесса моделирования), так и в динамическом режиме (после запуска процесса моделирования с помощью команд RMAP).

Анализ работы системы выполняется на основе наблюдения за такими характеристиками как задержки передачи данных, пропускная способность, занятость буферов, количество отправленных и принятых пакетов. Значение каждой характеристики определяется с помощью статистической обработки всей информации, полученной в процессе моделирования.

MOST применялся для анализа функционирования распределенной бортовой системы, построенной на основе технологии SpaceWire, предназначенной для организации управления ПН КА из состава миссии «Veri-Colombo» [39].

2.1.2. Simulator for High-speed Networks.

Simulator for High-speed Networks (SHINe) (Department of Information Engineering, University of Pisa) – это симулятор, предназначенный для моделирования работы систем, построенных на основе технологий SpaceFibre и SpaceWire, и предоставляющий возможность автоматического определения характеристик информационных потоков. SHINe разработан на основе симулятора OMNeT++ [40].

Одной из ключевых особенностей функциональных характеристик SHINe является обеспечение возможности создания новых прикладных протоколов и тестирования их с использованием уже существующих блоков SpaceFibre или SpaceWire.

Процесс моделирования работы системы на базе SpaceWire с помощью SHINe начинается с разработки инфраструктуры системы, которая осуществляется с помощью графического интерфейса или текстового описания (в соответствии со специальным форматом). Всякая инфраструктура системы, разрабатываемая в симуляторе, состоит из конечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов.

Для каждого конечного узла определяются информационные потоки, для которых, как и в случае с MOST, поддерживается ряд конфигураций,

таких как объем передаваемых данных, период передачи данных, передача данных с использованием транспортного протокола RMAP. Особенностью задания конфигураций для конечных узлов является возможность указания задержки для маршрутов передачи данных с целью моделирования наличия известных задержек.

Каждый маршрутизирующий коммутатор поддерживает работу механизмов удаления заголовка пакета, мультивещания, а также ГАМ. Задание логических адресов в таблице маршрутизации каждого маршрутизирующего коммутатора может проводиться двумя способами:

- предоставляться оператором в виде файла с соблюдением специального форматирования;
- автоматически генерироваться симулятором с применением алгоритма Дейкстры [41].

После размещения и конфигурации всех элементов они соединяются между собой с помощью соответствующих интерфейсов (SpaceFibre или SpaceWire). Пример модели системы, построенной с помощью симулятора SHINe, представлен на рисунке 7.

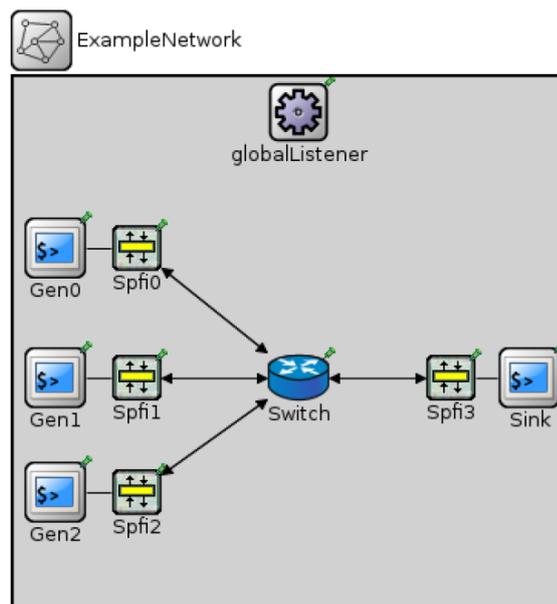


Рисунок 7 – Пример модели системы, построенной с помощью симулятора SHINe

Запуск моделирования доступен либо в графическом формате, когда данные, которыми обмениваются оконечные узлы, отображаются в виде распространяющихся сообщений, либо в формате командной строки. При использовании графического интерфейса также возможна приостановка моделирования с целью проверки состояния каждого элемента системы [42].

2.1.3. SpaceWire Automated NetWork Design and Simulation.

SpaceWire Automated NetWork Design and Simulation (SANDS) (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)) – комплекс автоматизированного проектирования и моделирования, предназначенный для поддержки полного процесса проектирования и моделирования систем, построенных на основе технологии SpaceWire, начиная с автоматической генерации инфраструктуры системы, заканчивая проведением анализа информационного взаимодействия.

Архитектура SANDS включает в себя четыре основных компонента:

1) Компонент для разработки инфраструктуры системы и оценки ее характеристик. Компонент позволяет решать следующие задачи:

- проектирование инфраструктуры системы;
- автоматическое преобразование инфраструктуры системы для достижения требуемого уровня отказоустойчивости;
- оценка характеристик проектируемой инфраструктуры системы: масса системы, энергопотребление элементов системы, диаметр системы, отказоустойчивость системы или ее отдельных регионов.

2) Компонент для прокладки и отслеживания маршрутов следования информационных потоков в моделируемой системе на базе SpaceWire. Компонент позволяет решать следующие задачи:

- генерация таблиц маршрутизации для конфигурации маршрутизирующих коммутаторов;
- генерация резервных маршрутов следования данных;

– оценка задержек передачи данных по различным маршрутам следования данных.

3) Компонент для генерации таблицы расписания транспортного протокола СТП-ИСС для передачи данных с заданным качеством сервиса планирования. Компонент позволяет решать задачу по созданию таблицы расписания, которая учитывает инфраструктуру системы и маршруты следования данных.

4) Компонент для моделирования работы системы на базе SpaceWire со всеми данными, которые компонент получил от других трех компонентов. Компонент позволяет решать следующие задачи:

– моделирование на уровне битов, которое охватывает полную иерархию уровней стандарта SpaceWire, транспортный уровень (RMAP и СТП-ИСС), а также уровень приложения;

– моделирование на пакетном уровне, которое охватывает ограниченную иерархию уровней стандарта SpaceWire (сетевой), транспортный уровень (RMAP и СТП-ИСС), а также уровень приложения [43].

Каждый из обозначенных компонентов может быть использован отдельно в зависимости от решаемых задач. Архитектура SANDS представлена на рисунке 8.

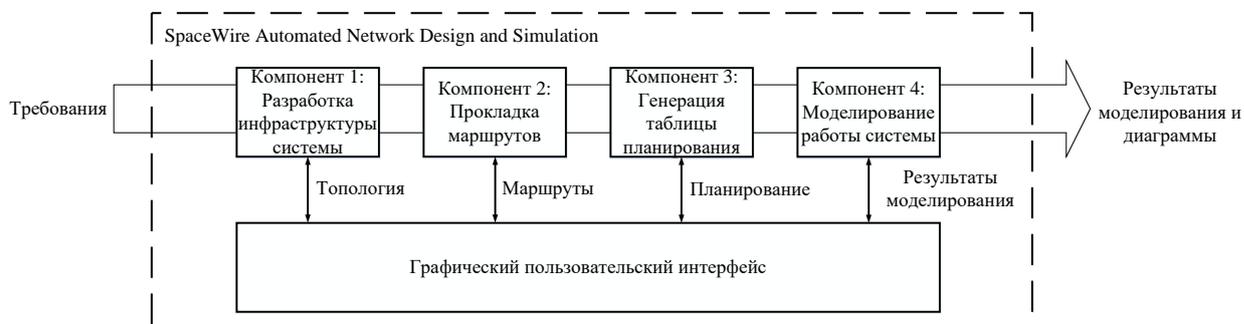


Рисунок 8 – Архитектура SANDS

Разработка инфраструктуры системы осуществляется с помощью графического пользовательского интерфейса, разработанного в рамках проекта Visual Integrated Development Environment (VIPE) [44], позволяющего проектировать системы для обеспечения передачи данных в интерактивном режиме. Доступно размещение двух типов элементов: конечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов. Пример модели системы, построенной с помощью комплекса автоматизированного проектирования и моделирования SANDS, представлен на рисунке 9.

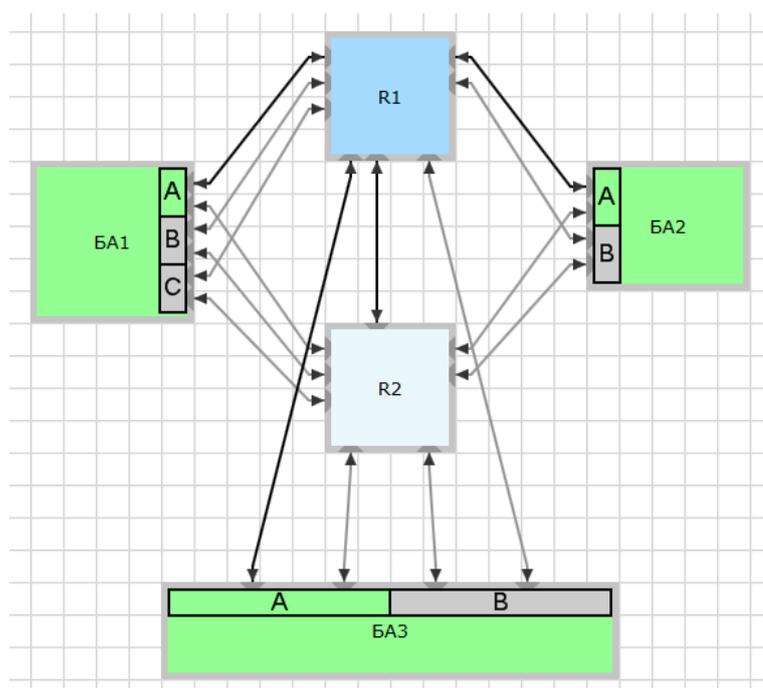


Рисунок 9 – Пример модели системы, построенной с помощью SANDS

Библиотека элементов предоставляет выбор из нескольких конечных узлов (отличаются числом комплектов и портов) и маршрутизирующих коммутаторов (отличаются числом портов), для которых изначально не заданы конфигурации. Каждый из элементов может быть сконфигурирован по множеству параметров.

В ходе анализа работы системы представляется информация, объем которой регулируется пользователем перед запуском моделирования. В

частности, может быть представлена подробная информация о каждом отдельном пакете (команда RMAP, пакет СТП-ИСС), переданном в процессе моделирования [45].

2.1.4. Прочие разработки в области имитационного моделирования.

Модель SpaceWire разработки Sandia National Laboratories является симулятором, который также как и MOST построен на основе OPNET Modeler. Особенностью симулятора является то, что он позволяет работать с одним универсальным типом элемента системы на базе SpaceWire, который конфигурируется в качестве модуля одного из трех типов: оконечного узла, маршрутизирующего коммутатора и широковещательного сервера. Последний из модулей, в сущности, реализует функциональные характеристики маршрутизирующих коммутаторов, обеспечивающих мультивещательную передачу пакетов [46].

Возможность моделирования работы систем на базе SpaceWire предоставляется с помощью симулятора VisualSim, разработчиком которого является Mirabilis Design. С помощью симулятора обеспечивается возможность разработки инфраструктуры системы на основе оконечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов, которые конфигурируются по широкому спектру параметров в соответствии с уровнями стандарта SpaceWire – от символьного до сетевого. По итогам моделирования VisualSim позволяет определять такие характеристики как загрузка каналов передачи данных, задержки передачи данных, энергопотребление элементов системы и другие [47].

Предшественником SANDS является другой симулятор, разработанный ГУАП – DCNSimulator. С помощью данного симулятора обеспечивается разработка инфраструктуры системы на базе SpaceWire на основе оконечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов в MS Visio и последующее моделирование с определением ряда характеристик системы [48].

SPACEMAN – инструмент администрирования систем на базе SpaceWire, являющийся разработкой ИТТИ. Главным образом, данный

инструмент позволяет исследовать работу построенных систем с помощью применения протокола Network Discovery and Configuration Protocol (NDCP) [49]. Кроме того, SPACEMAN предоставляет возможность подключения реальных элементов систем на базе SpaceWire к собранной модели [50].

Симулятор систем на базе SpaceWire разработки Information Technology R&D Center (Mitsubishi Electric Corporation) построенный на основе симулятора NS-3. Особенностью работы данного образца является то, что он позволяет управлять передачей данных из состава информационных потоков конечных узлов не только с заданной периодичностью, но и с использованием модели простейшего или стационарного пуассоновского процесса [51].

Упомянутые в данном разделе технические решения обладают меньшим, либо специфичным набором функциональных характеристик по сравнению с теми, что рассматривались более подробно ранее.

2.2. Аппаратно-программное моделирование.

На сегодняшний день существует множество стендов и рабочих мест, позволяющих проводить аппаратно-программное моделирование работы систем на базе SpaceWire. Как правило, в качестве аппаратной основы данных технических решений применяется специализированное оборудование, разработкой которого занимается ряд компаний:

1) STAR-Dundee. Аэрокосмическая компания, которая главным образом специализируется на технологиях информационного взаимодействия на борту КА. На сегодняшний день компания является крупным поставщиком испытательного оборудования и сложнофункциональных блоков для мировых космических агентств. STAR-Dundee – мировой лидер в области технологий SpaceWire и SpaceFibre. Прежде всего, данное лидерство обусловлено тем, что компания была основана на базе Центра космических технологий университета Данди (Space Technology Centre at the University of Dundee) в 2002 году, который в свою очередь являлся одним из важнейших центров разработки технологии SpaceWire [52].

2) 4Links. Компания, специализирующаяся на разработке и производстве высококачественного испытательного и измерительного оборудования SpaceWire для наземного использования. 4Links на протяжении многих лет сотрудничает с ESA, NASA, JAXA, Cobham и другими малыми и крупными коммерческими компаниями. Наряду со StarDundee компания 4Links также внесла значительный вклад в развитие технологии SpaceWire и в космическую промышленность по всему миру [53].

3) TELETEL S.A. Компания, занимающаяся разработкой программных и аппаратных инновационных решений в космической и оборонной промышленности. TELETEL S.A. разрабатывает проекты предназначенные для систем передачи информации, военной связи, бортового программного обеспечения (БПО) КА и т.д. Данные проекты представляют собой различные протоколы связи, испытательные стенды и симуляторы. Компания сотрудничает с крупными европейскими промышленными компаниями, такими как AIRBUS, THALES, MBDA и др. Разработка испытательного оборудования SpaceWire также входит в список проектов TELETEL S.A. [54].

4) МиТ. Коллектив ООО НПЦ «МиТ» является отечественной компанией, основная деятельность которой находится в области разработки и тестирования сложных вычислительных систем, базирующихся на технологиях SpaceWire и SpaceFibre. Среди разновидностей проектов компании можно выделить проектирование программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и интегральных схем специального назначения (ASIC), разработку БПО, а также разработку тестового оборудования, в чем компания МиТ занимает лидирующие позиции в России [55].

Существуют и другие компании, занимающиеся разработкой специализированного оборудования, такие как Dynamic Engineering [56], ShimaFuji Electric Incorporated [57], VXI-Системы [58] и др.

2.2.1. Специализированное оборудование SpaceWire.

Каждая из обозначенных компаний имеет собственные линейки специализированного оборудования, обладающего различными

функциональными характеристиками. В области моделирования работы систем на базе SpaceWire выделяются три основных типа применяемого специализированного оборудования.

2.2.1.1. Интерфейсные мосты.

1) Общее описание. Интерфейсные мосты предназначены для обеспечения возможности передачи и приема данных между двумя различными интерфейсами, одним из которых является SpaceWire.

2) Схема подключения. Интерфейсные мосты подключаются к какому-либо устройству по SpaceWire с одной стороны и к вычислительному устройству по интерфейсу управления с другой стороны. Схема подключения интерфейсного моста представлена на рисунке 10.

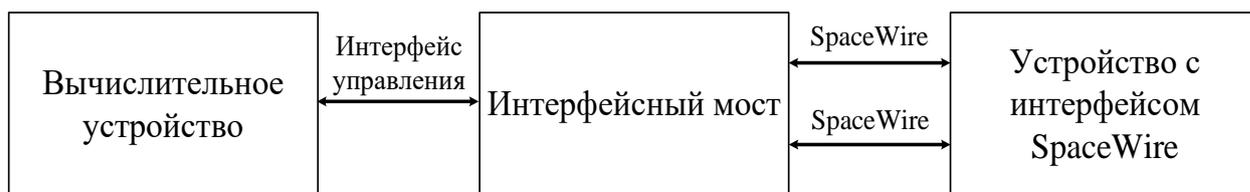


Рисунок 10 – Схема подключения интерфейсного моста

3) Функциональные характеристики. Интерфейсные мосты обеспечивают возможность формирования и передачи, приема и обработки данных и служебной информации по SpaceWire. Данные процессы управляются с вычислительного устройства. Среди областей применения интерфейсных мостов можно выделить следующие:

а) Конфигурация устройств по SpaceWire. Интерфейсные мосты могут быть применены для передачи на подключенные к ним по SpaceWire устройства конфигурационной информации.

б) Тестирование устройств, имеющих в своем составе интерфейс SpaceWire. Интерфейсные мосты могут быть применены для формирования тестовых последовательностей данных и служебной информации с целью проверки реакции на эти последовательности тестируемых устройств. Как

правило, данные последовательности позволяют проверить соответствие тестируемого устройства требованиям определенных пунктов стандарта SpaceWire на уровнях от символьного до сетевого.

в) Моделирование функционирования оконечного узла из состава распределенной бортовой системы на базе SpaceWire. Интерфейсные мосты под управлением вычислительных устройств позволяют моделировать работу оконечных узлов систем на базе SpaceWire. Несколько моделей оконечных узлов вместе с маршрутизирующими коммутаторами позволяют построить модель системы на базе SpaceWire.

4) Сопоставление образцов. В сложившейся мировой практике для интерфейсных мостов определяется ряд технических и функциональных характеристик. В таблице 8 представлено сопоставление различных образцов интерфейсных мостов.

Таблица 8 – Сравнительная таблица различных образцов интерфейсных мостов

| Параметр | SpaceWire Brick Mk4 [59] | Diagnostic SpaceWire Interface [60] | SpaceWire Front-End / Link Analyser [61] | Мост Ethernet-SpaceWire [62] | SpaceWire-to-GigabitEtherR2 [63] |
|--|---------------------------------|--|---|-------------------------------------|---|
| Производитель | STAR-Dundee | 4Links | TELETEL S.A. | MIT | Shimafuji |
| Интерфейсы управления | USB | Ethernet | Ethernet, USB, DVI, HDMI, Wi-Fi | Ethernet | Ethernet |
| Количество портов SpaceWire | 2 | До 8 | До 16 | 2 | 4 |
| Скорость работы портов SpaceWire, Мбит/с | До 300 | До 400 | До 400 | До 500 | До 200 |
| Возможность ввода ошибок | + | + | + | + | – |
| Поддержка RMAP | + | + | + | – | – |
| Наличие графического интерфейса | + | – | + | – | – |
| Наличие дисплея | – | + | – | – | – |

2.2.1.2. Лабораторные маршрутизирующие коммутаторы.

1) Общее описание. Лабораторные маршрутизирующие коммутаторы предназначены для обеспечения возможности организации связи множества устройств по SpaceWire и создания, таким образом, некоторой инфраструктуры системы.

2) Схема подключения. Лабораторные маршрутизирующие коммутаторы подключаются к другим устройствам по SpaceWire. При наличии интерфейса управления, лабораторные маршрутизирующие коммутаторы могут подключаться к вычислительному устройству. Схема подключения лабораторного маршрутизирующего коммутатора представлена на рисунке 11.

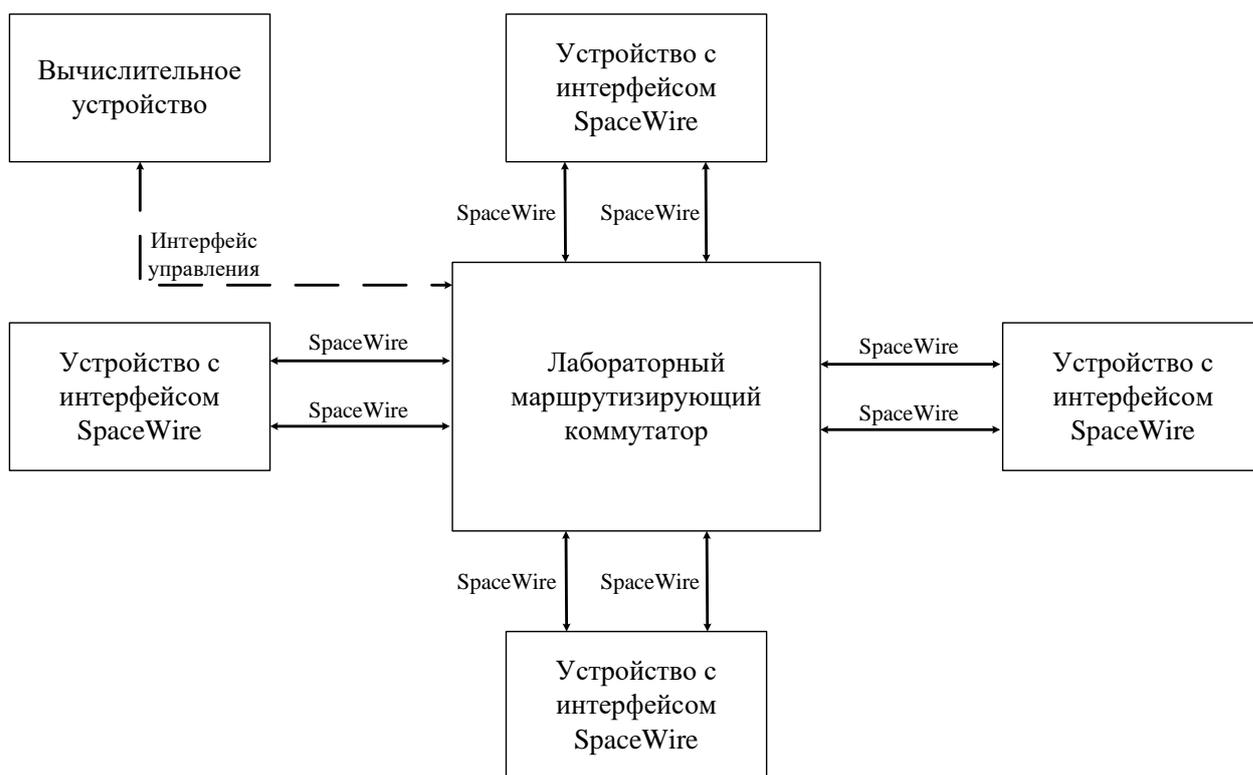


Рисунок 11 – Схема подключения лабораторного маршрутизирующего коммутатора

3) Функциональные характеристики. Лабораторные маршрутизирующие коммутаторы обеспечивают возможность имитации

работы опытных образцов маршрутизирующих коммутаторов с возможностью задания ряда конфигураций.

4) Сопоставление образцов. В сложившейся мировой практике для лабораторных маршрутизирующих коммутаторов определяется ряд технических и функциональных характеристик. В таблице 9 представлено сопоставление различных образцов лабораторных маршрутизирующих коммутаторов.

Таблица 9 – Сравнительная таблица образцов лабораторных маршрутизирующих коммутаторов

| Параметр | SpaceWire Router Mk2S [64] | Flexible SpaceWire Router [65] | Маршрутизирующий коммутатор на базе СБИС 1931КХ014 [66] |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|--|
| Производитель | STAR-Dundee | 4Links | АО «РЕШЕТНЕВ» |
| Количество портов SpaceWire | 8 | 8 | 12 |
| Скорость работы портов SpaceWire, Мбит/с | До 200 | До 400 | До 100 |
| Возможность ввода ошибок | + | + | – |
| Поддержка удаления заголовка | + | + | + |
| Поддержка арбитража | – | – | + |
| Поддержка мультивещания | + | + | + |
| Поддержка ГАМ | + | + | + |
| Поддержка RMAP | + | + | + |
| Наличие интерфейса управления | + | + | + |

2.2.1.3. Анализаторы.

1) Общее описание. Анализаторы предназначены для осуществления записи всех передаваемых по выделенному для анализа соединению системы на базе SpaceWire данных и их последующей передачи на вычислительное устройство.

2) Схема подключения. Анализаторы подключаются в разрыв соединения SpaceWire с одной стороны и к вычислительному устройству с другой стороны. Схема подключения анализатора представлена на рисунке 12.

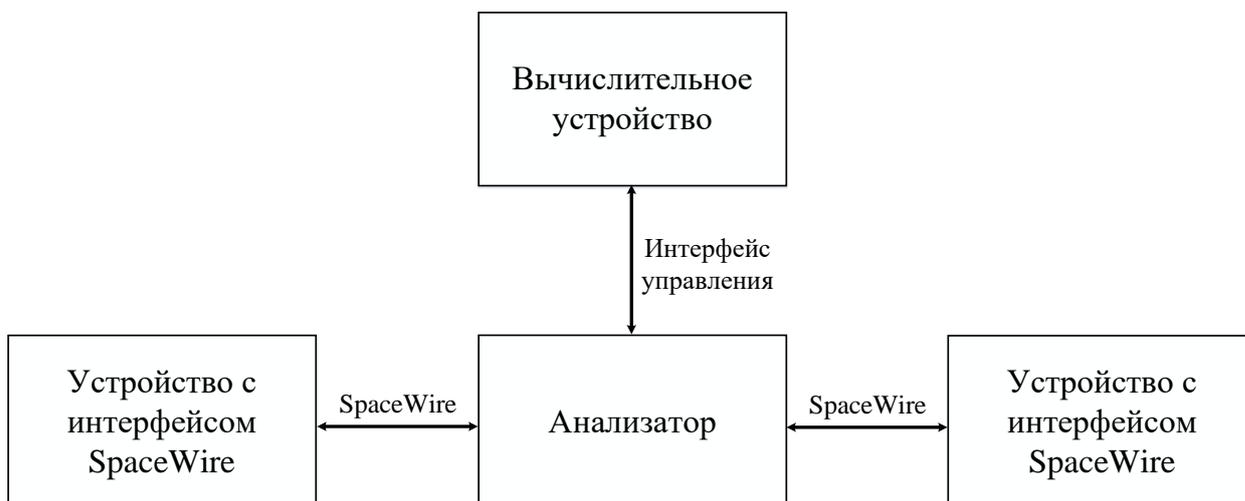


Рисунок 12 – Схема подключения анализатора

3) **Функциональные характеристики.** Анализаторы обеспечивают следующие возможности:

а) Запись данных и служебной информации, передаваемых по соединению, в разрыв которого установлен анализатор. Данные и служебная информация принимаются одним из портов, записываются в память анализатора и передаются с другого порта (пара связанных портов определяются разработчиком).

б) Измерение и установка в соответствии записанным данным и служебной информации временных меток. При записи данных и служебной информации в память анализатора происходит присваивание им временных меток.

в) Передача данных и служебной информации, записанных в память анализатора на вычислительное устройство. После завершения записи данных и служебной информации анализатором она передается на вычислительное устройство для дальнейшей обработки.

4) **Сопоставление образцов.** В сложившейся мировой практике для анализаторов определяется ряд технических и функциональных характеристик. В таблице 10 представлено сопоставление различных образцов анализаторов.

Таблица 10 – Сравнительная таблица образцов анализаторов

| Параметр | SpaceWire Link Analyser Mk3 [67] | SpaceWire Recorder Mk2 [68] | Multi-link SpaceWire Recorder [69] | SpaceWire Front-End / Link Analyser | SpaceWire Monitor [70] |
|--|---|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Производитель | STAR-Dundee | STAR-Dundee | 4Links | TELETEL S.A. | Dynamic Engineering |
| Интерфейсы управления | USB | Ethernet, USB | Ethernet | Ethernet, USB, DVI, HDMI, Wi-Fi | PCIe |
| Количество портов SpaceWire | 2 | 8 | До 8 | До 16 | До 4 |
| Скорость работы портов SpaceWire, Мбит/с | До 400 | До 400 | До 400 | До 400 | До 200 |
| Поддержка анализа RMAP | + | + | + | + | – |
| Периодичность записи событий | 10 нс | 10 нс | 2 нс | 8 нс | 10 нс |
| Триггеры захвата | + | + | – | + | – |
| Уровни отображения сигнала | Сетевой, пакетный, символьный, сигнальный | Сетевой, пакетный | Пакетный, символьный, сигнальный | Сетевой, пакетный, символьный | Пакетный |
| Наличие графического интерфейса | + | + | – | + | – |
| Наличие дисплея | – | – | + | – | – |

2.2.1.4. Применение специализированного оборудования SpaceWire.

Рассмотренное специализированное оборудование является основой для создания стендов и рабочих мест, позволяющих проводить моделирование работы систем на базе SpaceWire. Структура модели такой системы иллюстрируется рисунком 13.

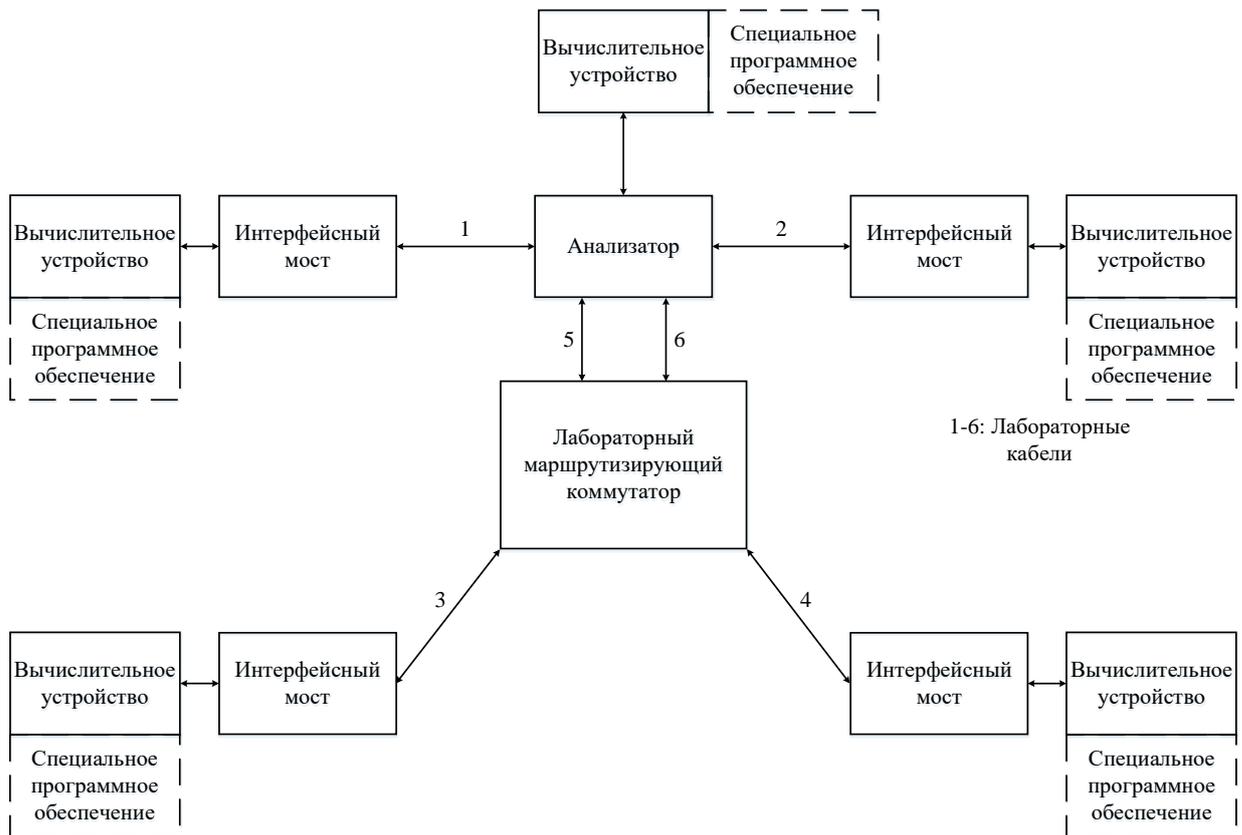


Рисунок 13 – Структура модели системы на базе SpaceWire, построенная с помощью какого-либо технического решения в области аппаратно-программного моделирования

Далее рассматриваются существующие технические решения в области аппаратно-программного моделирования с выделением их основных функциональных характеристик.

2.2.2. SpaceWire Interface Simulator.

SpaceWire Interface Simulator (SWIS) (German Aerospace Center) – представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из ПК, с реализованным на нем специальным программным обеспечением, и интерфейсного моста 4Links Diagnostic SpaceWire Interface, обеспечивающего непосредственную передачу данных в составе модели системы на базе SpaceWire. SWIS обеспечивает имитацию работы от одного до трех конечных узлов (обеспечивается возможность передачи данных максимум по трем линиям связи), что позволяет рассматривать его как элемент для построения модели соответствующей системы.

SWIS реализует концепцию «запрос – список действий», согласно которой пользователю предоставляется возможность задания различных списков действий (из ряда predetermined) относящихся к функционированию информационных потоков и вызова данных списков действий с помощью запросов. В процессе моделирования работы конечных узлов вызовы запросов выполняется в двух режимах:

– синхронный режим, предназначенный для моделирования передачи данных отдельных пакетов или их последовательностей по запросу пользователя;

– асинхронный режим, предназначенный для «фонового» моделирования передачи данных с установленной периодичностью без постоянных запросов со стороны пользователя.

SWIS предоставляет возможность задания широкого списка конфигураций информационных потоков: настройка передаваемых данных как на уровне пакетов, так и на уровне отдельных битов, настройка периодичности передачи данных, задержки перед передачей данных и пр. Особенностью работы SWIS является возможность задания влияния информационных потоков друг на друга с помощью указания относительных задержек передачи данных.

Результаты анализа работы моделей конечных узлов записываются в формируемый файл отчета и / или отображаются в режиме реального времени. Предоставляется регулируемый объем информации о передаваемых данных – временные метки, состав пакетов, сообщения об ошибках [71].

2.2.3. iSAFT Protocol Testing and Validation System.

iSAFT Protocol Testing and Validation System (iSAFT-PVS) (TELETEL S.A.) – платформа для проведения моделирования, тестирования и мониторинга распределенных бортовых систем КА. Особенностью платформы является то, что она позволяет работать с несколькими технологиями информационного взаимодействия, наиболее широко

применяемыми в космической отрасли: SpaceWire, MIL-STD-1553B и CAN-bus. Платформа iSAFT-PVS представлена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Платформа iSAFT-PVS

В зависимости от исследуемой распределенной бортовой системы платформа конфигурируется путем аппаратной установки отдельных интерфейсных плат в корпус, которые представлены на рисунке 15.



Рисунок 15 – Интерфейсные платы SpaceWire, MIL-STD-1553B и CAN-bus

Основные функциональные характеристики iSAFT-PVS:

- моделирование работы конечных узлов с возможностью задания различных режимов генерации пакетов данных;
- анализ передаваемых в моделируемой системе данных, включающий в себя расшифровку передаваемых данных, обеспечение фильтрации, обнаружение ошибок и статистическую обработку;
- тестирование на соответствие требованиям стандарта SpaceWire подключенного устройства.

В случае если в качестве задачи ставится проведение моделирования работы системы, построенной только на основе технологии SpaceWire, то iSAFT-PVS может предоставить до двадцати независимых работающих портов, каждый из которых осуществляет передачу данных на скорости до 400 Мбит/с. Исходя из данного факта каждый образец iSAFT-PVS обеспечивает потенциальную возможность моделирования работы до двадцати оконечных узлов (десяти, если для каждого оконечного узла выделить резервный порт).

Информационные потоки оконечных узлов поддерживают широкий список конфигураций. Из особенностей, как и для SWIS, допускается задание относительных задержек передачи данных из состава различных информационных потоков. Существует возможность моделирования сбойных ситуаций, регламентируемых стандартом SpaceWire (уровень обмена, сетевой уровень), в процессе передачи данных.

Анализ работы моделей оконечных узлов выполняется на основе статистической обработки данных, которые передавались и принимались каждым портом iSAFT-PVS:

- количество переданных и принятых пакетов;
- количество переданных и принятых байт пакетов;
- количество переданных и принятых управляющих символов и кодов;
- количество возникших ошибок.

iSAFT-PVS не был выделен как один из образцов специализированного оборудования из-за сложности его сопоставления с другими образцами вследствие специфичности функциональных характеристик [72].

2.2.4. Прочие разработки в области аппаратно-программного моделирования.

Следует также отметить, что специализированное оборудование часто применяется для решения частных задач – проведения экспериментальной отработки конкретного оборудования, протоколов, механизмов и т.д. В рамках данного раздела представлены примеры такого применения.

1) Проверка механизмов работы бортовых процессоров Atmel AT6981 Castor.

В 2014 году компанией STAR-Dundee было разработано рабочее место для проведения отработки передачи данных в соответствии с механизмами транспортного протокола SpaceWire-D [73] процессоров AT6981 [74]. Рабочее место содержит в своем составе два образца AT6981, специализированное оборудование компании STAR-Dundee – SpaceWire-USB Brick Mk2 и SpaceWire Link Analyser, а также вычислительные устройства для управления процессом отработки. Структурная схема рабочего места представлена на рисунке 16.

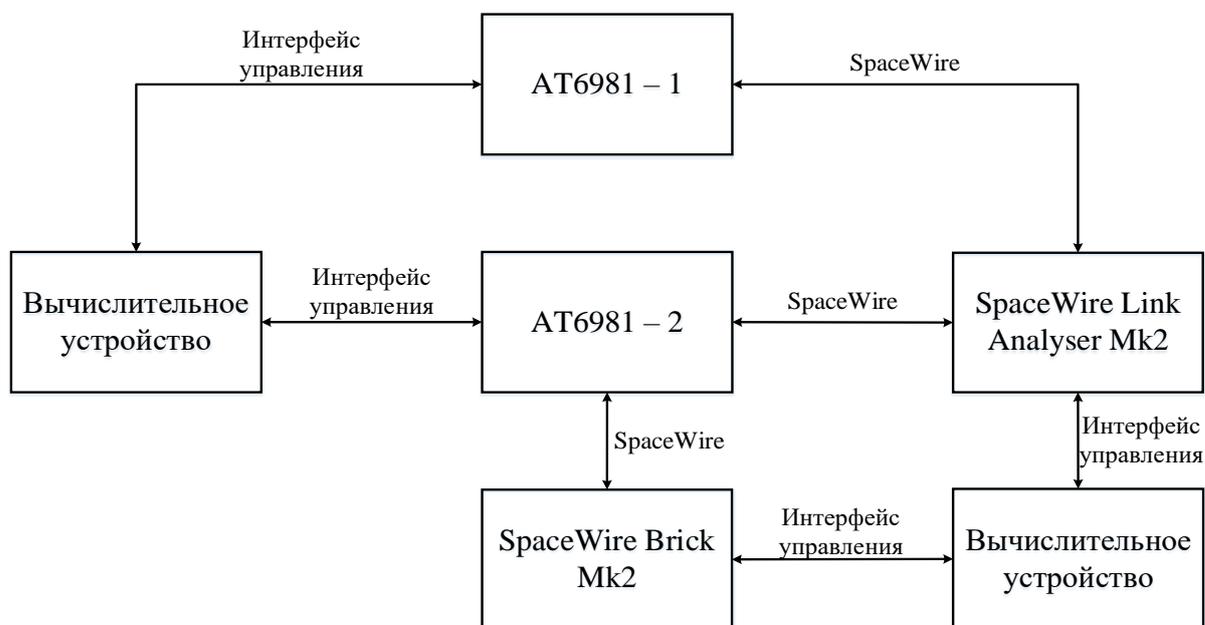


Рисунок 16 – Структурная схема рабочего места для проверки поддержки AT6981 механизмов протокола SpaceWire-D

AT6981 передают данные друг другу в соответствии с заданным расписанием, в котором временные интервалы, открывающие доступ для передачи данных каждым из AT6981, чередуются. Данные передаются через соединение, в котором подключен SpaceWire Link Analyser для обеспечения дальнейшего анализа. SpaceWire-USB Brick Mk2 выполняет функцию

мастера времени, генерирующего временные коды, которые являются одним из ключевых механизмов для работы протокола SpaceWire-D.

Результаты проверки подтвердили поддержку AT6981 механизмов протокола SpaceWire-D – передача данных между устройствами выполнялась в соответствии с заданным для них расписанием [75].

2) Проверка алгоритмов функционирования маршрутизирующих коммутаторов SpW-10X.

В 2013 году компанией 4Links было разработано рабочее место для проведения анализа потерь пакетов SpaceWire, связанных с переполнением буферов маршрутизирующих коммутаторов SpW-10X [76]. Рабочее место содержит в своем составе два образца маршрутизирующих коммутаторов SpW-10X, специализированное оборудование компании 4Links – Diagnostic SpaceWire Interface (DSI) и Multi-link SpaceWire Recorder (MSR), а также вычислительные устройства для управления процессом анализа. Структурная схема рабочего места представлена на рисунке 17.

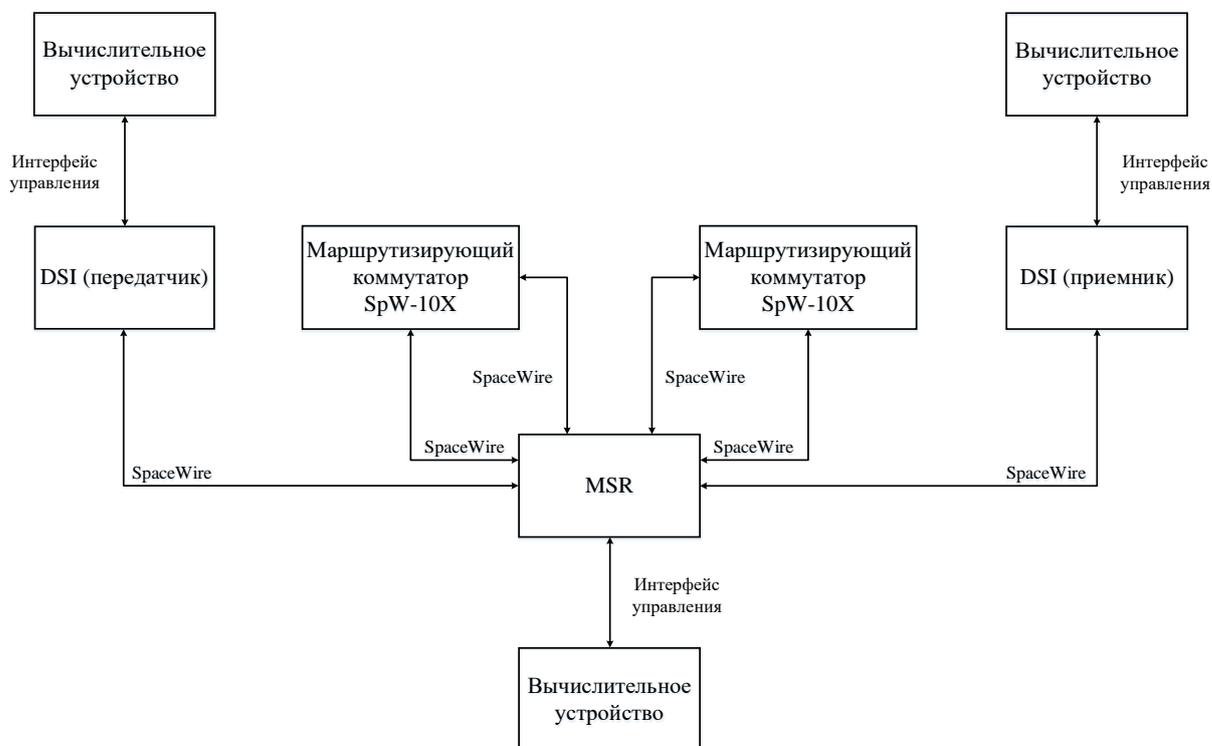


Рисунок 17 – Структурная схема рабочего места для анализа алгоритмов работы маршрутизирующих коммутаторов SpW-10X

Один DSI конфигурируется как передатчик пакетов, а другой – как приемник. В определенный момент времени по команде оператора приемник перестает принимать данные, что приводит к блокировке и заполнению буферов маршрутизирующих коммутаторов. Все передаваемые данные фиксируются с помощью MSR.

Данная проверка позволила экспериментально подтвердить объемы буферов маршрутизирующих коммутаторов, а также проанализировать работу механизма тайм-аута передачи пакетов [77].

3) Отработка информационного взаимодействия приборов из состава бортового комплекса управления (БКУ) по каналам SpaceWire.

В 2016 году в АО «РЕШЕТНЕВ» (АО «ИСС») было разработано рабочее место для проведения отработки информационного взаимодействия в составе БКУ, состоящего из нескольких оконечных узлов и одного или нескольких маршрутизирующих коммутаторов. Среди основных задач отработки выделяются:

- анализ сбоеучтойчивости каналов передачи данных;
- изучение принципов построения отказоустойчивых инфраструктур системы.

Рабочее место содержит в своем составе макетный образец бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК), состоящий из модуля внешней памяти (МВП) и вычислительного модуля (ВМ), макетный образец программируемого сетевого коммутатора (ПСК), специализированное оборудование компании STAR-Dundee – интерфейсные мосты (предположительно, SpaceWire Brick Mk2) и SpaceWire Router Mk2S, а также вычислительные устройства для управления процессом информационного взаимодействия. Структурная схема рабочего места представлена на рисунке 18.

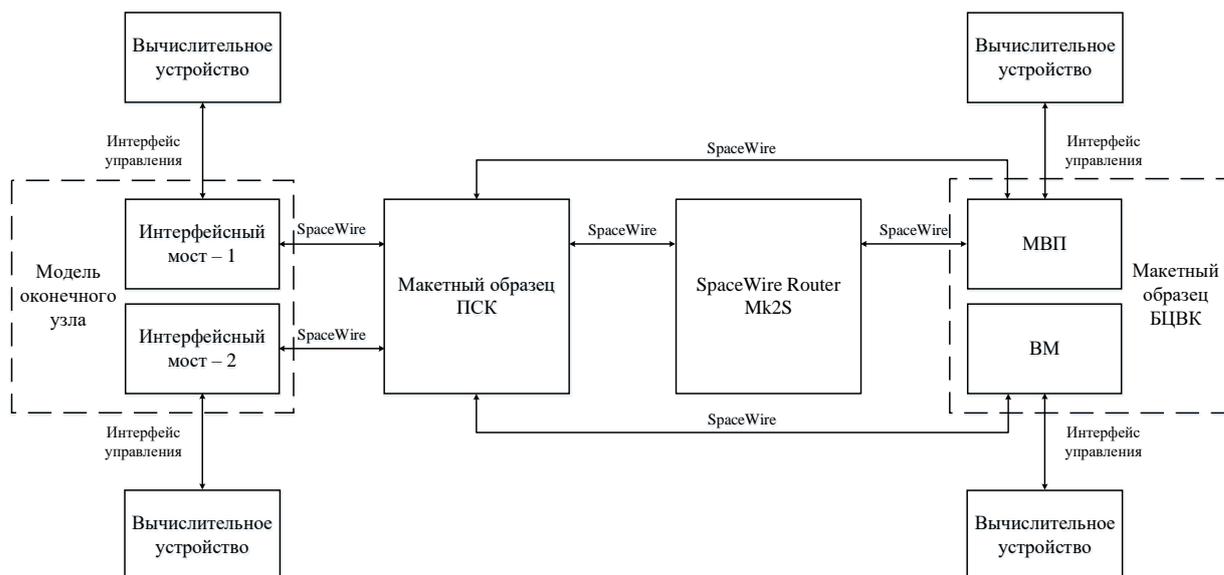


Рисунок 18 – Структурная схема рабочего места обработки информационного взаимодействия в составе БКУ

С помощью специализированного оборудования при информационном взаимодействии в составе БКУ вносились различные ошибки, а также имитировались отказы для анализа функционирования макетных образцов в критических ситуациях.

Таким образом, была проведена отработка передачи данных оконечными узлами в составе БКУ с проведением анализа отказоустойчивости. При этом была проведена верификация схемно-конструкторских решений по реализации контроллеров и портов SpaceWire, а также проверена корректность алгоритмов работы БПО [78].

4) Аэрокосмический стенд SpaceWire для исследования, сертификации и тестирования.

В 2022 году в Санкт-Петербургском ГУАП был разработан аэрокосмический стенд SpaceWire для исследования, сертификации и тестирования (АССИСТ) – установка, предназначенная для проведения исследований разработок в области технологии SpaceWire, относящихся к аппаратным средствам, ПО и системам в целом. Среди основных задач, стоящих перед стендом, выделяются:

- тестирование бортового оборудования на совместимость с различным оборудованием, обеспечивающим работу систем на базе SpaceWire;
- тестирование бортового оборудования на соответствие требованиям стандарта SpaceWire;
- тестирование бортового оборудования на соответствие требованиям стандартов транспортных протоколов, работающих совместно со SpaceWire;
- разработка и практическая проверка новых протоколов сетевого и транспортного уровня для систем на базе SpaceWire.

В одном из вариантов сборки АССИСТ имеет в своем составе оборудование компании АО НПЦ «ЭЛВИС» – модуль отладочный Салют-ЭЛ24ОМ1 (оконечный узел), модуль отладочный МС-30SF6ЕМ-6U (оконечный узел) и модуль отладочный МСК-02РЕМ-3U (маршрутизирующий коммутатор) [79], специализированное оборудование компании МиТ – Мост Ethernet-SpaceWire, а также вычислительное устройство для управления стендом. Пример сборки АССИСТ представлен на рисунке 19 [80].



Рисунок 19 – Пример сборки АССИСТ

2.3. Анализ возможности применения существующих комплексов моделирования.

Прежде всего, проводится анализ возможности применения рассмотренных технических решений в области имитационного и аппаратно-программного моделирования для обеспечения решения определенных в первой главе задач, стоящих перед комплексом моделирования работы систем на базе SpaceWire:

1) Определение характеристик информационных потоков. Каждое из представленных технических решений в области имитационного и аппаратно-программного моделирования позволяет решать обозначенную задачу. Объем предоставляемой информации является различным.

2) Исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов. Ни одно из представленных технических решений в области имитационного и аппаратно-программного моделирования не позволяет автоматизировать решение обозначенной задачи. Для того, чтобы провести подобные исследования необходим последовательный запуск нескольких итераций моделирования, для каждой из которых вручную изменялись бы значения факторов. Обработка полученных по результатам моделирования результатов для каждой итерации производилась бы с использованием сторонних средств.

Аналогичным образом проводится анализ возможности применения рассмотренных технических решений в области имитационного и аппаратно-программного моделирования для обеспечения задания необходимых конфигурационных параметров модели системы на базе SpaceWire. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 11, где с помощью обозначений «+» и «-» указывается наличие возможности задания того или иного конфигурационного параметра с помощью каждого технического решения.

Таблица 11 – Анализ возможности применения выделенных комплексов моделирования для обеспечения задания необходимых конфигурационных параметров модели системы на базе SpaceWire

| Параметр конфигурации | MOST | SHINe | SANDS | SWIS | iSAFT-PVS |
|---|------|-------|-------|------|-----------|
| Объем передаваемых данных | + | + | + | + | + |
| Период передачи данных | + | + | + | + | + |
| Передача данных по запросу | – | – | – | – | – |
| Задержка передачи данных | + | + | + | + | + |
| Взаимосвязь информационных потоков | – | – | – | – | – |
| Транспортный протокол RMAP | | | | | |
| Тип команды | + | + | + | + | + |
| Требование ответа | + | + | + | + | + |
| Максимальное количество передач | – | – | – | – | – |
| Таймер повтора | – | – | – | – | – |
| Транспортный протокол СТП-ИСС | | | | | |
| Тип пакета | + | – | + | – | – |
| Требование подтверждения приема | + | – | + | – | – |
| Таймер времени жизни пакета | + | – | + | – | – |
| Таймер повтора | + | – | + | – | – |
| Скорость передачи данных | | | | | |
| Оконечные узлы | + | + | + | + | + |
| Маршрутизирующие коммутаторы | + | + | + | + | + |
| Параметры ключевых механизмов (маршрутизирующие коммутаторы) | | | | | |
| Удаление заголовка | + | + | + | – | – |
| Арбитраж | + | – | – | – | – |
| Мультивещание | + | + | – | – | – |
| Групповая адаптивная маршрутизация | + | + | – | – | – |

Из представленной таблицы следует, что ни одно из рассмотренных технических решений не обеспечивает задание определенных в первой главе конфигурационных параметров комплекса моделирования в полном объеме. Основным недостатком является невозможность обработки информации об особенностях передачи данных из состава информационных потоков:

– невозможность моделирования передачи данных из состава информационных потоков по запросу;

– невозможность моделирования передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков. Частично данная функция предоставляется SWIS и iSAFT PVS – допускается задание относительных задержек передачи данных из состава различных информационных потоков. Тем не менее, недоступным является полное ограничение передачи данных из состава информационных потоков в случае возникновения ошибок в процессе передачи данных из состава других информационных потоков;

– невозможность моделирования повторной передачи данных из состава информационных потоков с использованием транспортного протокола RMAP.

В качестве еще одного недостатка выделяется способ внедрения искажений в передаваемые данные. MOST и iSAFT PVS позволяют организовывать моделирование сбойных ситуаций, регламентированных стандартом SpaceWire (уровень обмена, сетевой уровень). SANDS и SWIS позволяют задавать параметр коэффициента битовых ошибок. Данные возможности не позволяют в полной мере обеспечивать воспроизведение условий, в которых функционируют распределенные бортовые системы КА.

Таким образом, ни одна из представленных разработок не отвечает предъявляемым требованиям в полном объеме. Данный факт обуславливает необходимость проведения исследования по разработке нового комплекса моделирования, обеспечивающего полный спектр функциональных характеристик для поддержки процесса создания распределенных бортовых систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА.

2.4. Выводы по второй главе.

Обеспечение выполнения задач, ставящихся в процессе создания систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА требует применения средств комплексов моделирования. В рамках данной главы обзревается существующие комплексы моделирования. Обзор

позволил выявить, что данные комплексы относятся к имитационному и аппаратно-программному моделированию в зависимости от способа представления реального объекта.

1) В области имитационного моделирования применяются технические решения, позволяющие строить модели систем на базе SpaceWire, основой которых являются виртуальные модели элементов данных систем, после чего запускать процесс моделирования, по результатам которого выдается отчет с настраиваемым объемом информации. Примерами таких разработок являются MOST, SHINe, SANDS и другие.

2) В области аппаратно-программного моделирования применяются технические решения, которые предоставляют возможность построения моделей систем на базе SpaceWire с использованием специализированного оборудования, представленного интерфейсными мостами, лабораторными маршрутизирующими коммутаторами и анализаторами. Среди разработок, относящихся к данной разновидности моделирования, выделяются SWIS и iSAFT PVS. Прочие технические решения в данной области, как правило, предназначены для решения узкого спектра задач.

3) В процессе анализа возможности применения существующих разработок выявлено, что ни одна из них не отвечает сформулированным в первой главе требованиям, ставящимся перед комплексом моделирования, предназначенным для применения в процессе создания систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА, в полном объеме. На данном основании ставится задача проведения исследований по проектированию и разработке комплекса моделирования, отвечающего всем сформулированным требованиям.

3. Проведение исследований по проектированию и разработке комплекса моделирования работы систем на базе SpaceWire.

Исследования по проектированию и разработке комплекса моделирования подразделяются на три основные части. В первой части проводится исследование по проектированию структуры комплекса моделирования, во второй – по разработке алгоритмов его функционирования. В третьей части представлена разработка методики, в соответствии с которой осуществляются исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов. Для каждой части выделяется ряд последовательно решаемых задач. Общая схема проведения исследований представлена на рисунке 20.

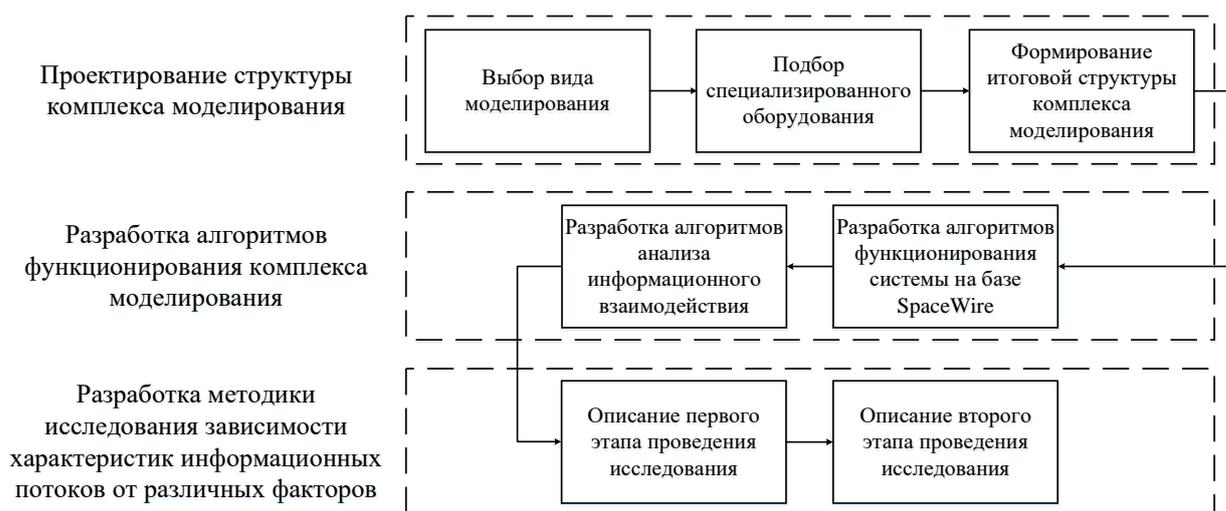


Рисунок 20 – Общая схема проведения исследований

Разработка программного обеспечения, реализующего предложенные технические решения не выносятся на рассмотрение в рамках диссертационного исследования.

3.1. Проектирование структуры комплекса моделирования.

Структура комплекса моделирования является основой для последующего проведения исследования по разработке алгоритмов его функционирования. Структура формируется на основании принятия решения

о выборе вида моделирования и осуществлении подбора необходимых технических средств.

3.1.1. Выбор вида моделирования.

Структуры моделей систем на базе SpaceWire отличаются в зависимости от выбранного вида моделирования, о чем свидетельствуют рисунки 6 и 13. Одним из главных критериев выбора вида моделирования является количество конечных узлов в создаваемой системе, с ростом которого возрастает сложность реализации и увеличиваются затраты ресурсов в случае организации аппаратно-программного моделирования. Имитационное моделирование позволяет организовывать системы с большим количеством конечных узлов, но при этом обладает другим недостатком – потенциально более низкой точностью, связанной с априорной неопределенностью математического описания процессов, проходящих в объекте моделирования.

Выбор вида моделирования осуществляется на основании текущего потенциального применения разработки – создания систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА. В ранее рассмотренной системе из состава одного из отечественных КА количество конечных узлов ограничено четырьмя (без учета резервных комплектов). Данный факт обуславливает возможность применения средств аппаратно-программного моделирования. Поскольку в данном случае ряд особенностей работы модели, таких как, например, физическая передача данных по каналу SpaceWire, полностью соответствуют аналогичным особенностям работы объекта моделирования, то целесообразно применение именно данного вида моделирования. Дополнительно следует отметить, что применение аппаратно-программного моделирования позволяет расширить функциональные характеристики разработки в области проведения тестирования реальных элементов системы на соответствие требованиям стандарта SpaceWire, а также стандартов транспортных протоколов, работающих совместно со SpaceWire.

3.1.2. Подбор специализированного оборудования.

Аппартно-программное моделирование работы систем на базе SpaceWire осуществляется с помощью специализированного оборудования. Возникает необходимость выбора образцов оборудования из числа тех, для которых может быть установлена принципиальная возможность применения. Для обоснования выбора образцов применяются матрицы принятия решений, т.к. данный инструмент позволяет сравнить несколько равнозначных вариантов решения задачи. Матрица организуется следующим образом:

- варианты решения задачи перечисляются в первой строке матрицы, а критерии для этих вариантов в первом столбце;
- каждому критерию присваивается вес (указывается в скобках);
- заполнение ячеек матрицы происходит путем оценивания каждого варианта по всем заданным критериям;
- в заполненной матрице полученные значения критериев умножаются на их вес для каждого варианта решения;
- полученные в матрице значения складываются для каждого варианта решения. Наибольшее полученное значение соответствует наилучшему варианту решения [81].

Для рассматриваемой разработки вес для каждого из критериев устанавливается в диапазоне от 1 до 5. Оценка для каждого из критериев, имеющих количественный характер устанавливается в диапазоне от 1 до 5. Оценка для каждого из критериев, имеющих качественный характер устанавливается в значение 0 или 1.

Следует отметить, что в процессе определения оценок учитывается то, что технические и функциональные характеристики специализированного оборудования определяют граничные условия, при которых модель будет соответствовать объекту моделирования. В случае если, например, требуется обеспечить моделирование работы системы на базе SpaceWire, в которой скорость передачи данных устанавливается равной 100 Мбит/с, то выбор

оборудования, способного передавать данные со скоростью не более 50 Мбит/с является нежелательным.

3.1.2.1. Интерфейсные мосты SpaceWire.

Среди интерфейсных мостов SpaceWire проводится сравнение между следующими образцами: SpaceWire Brick Mk4 (STAR-Dundee), Diagnostic SpaceWire Interface (4Links), Мост Ethernet-SpaceWire (МиТ). Матрица принятия решений по выбору образцов интерфейсных мостов SpaceWire для применения в составе комплекса моделирования представлена в таблице 12.

Таблица 12 – Матрица принятия решений по выбору образцов интерфейсных мостов SpaceWire

| Параметр | SpaceWire Brick Mk4 | Diagnostic SpaceWire Interface | Мост Ethernet-SpaceWire |
|---|---------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Количество портов SpaceWire (5) | 3 | 5 | 3 |
| Скорость работы портов SpaceWire (3) | 3 | 4 | 5 |
| Возможность независимой работы портов (5) | 1 | 1 | 1 |
| Возможность ввода искажений (5) | 1 | 1 | 1 |
| Поддержка RMAP (2) | 1 | 0 | 0 |
| Наличие графического интерфейса (2) | 1 | 0 | 0 |
| Наличие дисплея (1) | 0 | 1 | 0 |
| Итого: | 38 | 48 | 40 |

На основании данного сравнения принято решение о применении образцов Diagnostic SpaceWire Interface (DSI). Среди ключевых достоинств оборудования выделяется количество портов (8) и возможность их независимой работы. Внешний вид образца DSI представлен на рисунке 21.



Рисунок 21 – Внешний вид образца DSI

3.1.2.2. Лабораторные маршрутизирующие коммутаторы.

Среди лабораторных маршрутизирующих коммутаторов проводится сравнение между следующими образцами: SpaceWire Router Mk2S (STAR-

Dundee), Flexible SpaceWire Router (4Links), Маршрутизирующий коммутатор на базе СБИС 1931КХ014 (АО «РЕШЕТНЁВ»). Матрица принятия решений по выбору образцов лабораторных маршрутизирующих коммутаторов для применения в составе комплекса моделирования представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Матрица принятия решений по выбору образцов лабораторных маршрутизирующих коммутаторов

| Параметр | SpaceWire Router Mk2S | Flexible SpaceWire Router | Маршрутизирующий коммутатор на базе СБИС 1931КХ014 |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------|--|
| Количество портов SpaceWire (5) | 3 | 3 | 5 |
| Скорость работы портов SpaceWire (3) | 3 | 5 | 2 |
| Поддержка удаления заголовка (2) | 1 | 1 | 1 |
| Поддержка арбитража (2) | 0 | 0 | 1 |
| Поддержка мультивещания (2) | 1 | 1 | 1 |
| Поддержка ГАМ (2) | 1 | 1 | 1 |
| Поддержка RMAP (2) | 1 | 1 | 1 |
| Наличие интерфейса управления (2) | 1 | 1 | 1 |
| Итого: | 39 | 40 | 43 |

На основании данного сравнения принято решение о применении образцов Маршрутизирующих коммутаторов на базе СБИС 1931КХ014. Среди ключевых достоинств оборудования выделяется количество портов (12), а также поддержка арбитража. Внешний вид Маршрутизирующего коммутатора на базе СБИС 1931КХ014 представлен на рисунке 22.



Рисунок 22 – Внешний вид Маршрутизирующего коммутатора на базе СБИС 1931КХ014

3.1.2.3. Анализаторы.

Среди анализаторов проводится сравнение между следующими образцами: SpaceWire Link Analyser Mk3 (STAR-Dundee), Multi-Link SpaceWire Recorder (4Links). Матрица принятия решений по выбору образцов анализаторов для применения в составе комплекса моделирования представлена в таблице 14.

Таблица 14 – Матрица принятия решений по выбору образцов анализаторов

| Параметр | SpaceWire Link Analyser Mk3 | Multi-Link SpaceWire Recorder |
|--|-----------------------------|-------------------------------|
| Количество портов SpaceWire (5) | 3 | 5 |
| Скорость работы портов SpaceWire (3) | 5 | 5 |
| Поддержка анализа RMAP (2) | 1 | 1 |
| Периодичность записи меток времени (5) | 3 | 5 |
| Наличие триггеров захвата (2) | 1 | 0 |
| Уровни отображения сигнала (2) | 4 | 2 |
| Наличие графического интерфейса (2) | 1 | 0 |
| Наличие дисплея (1) | 0 | 1 |
| Итого: | 51 | 68 |

На основании данного сравнения принято решение о применении образцов Multi-Link SpaceWire Recorder (MSR). Среди ключевых достоинств оборудования выделяется количество портов (8), а также наилучшая периодичность записи меток времени. Внешний вид образца MSR представлен на рисунке 23.



Рисунок 23 – Внешний вид образца MSR

3.1.3. Формирование итоговой структуры комплекса моделирования.

На основании приведенной информации формируется структура комплекса моделирования, состоящая из специализированного

оборудования, управляемого с помощью средств специального программного обеспечения (СПО). Структура комплекса моделирования представлена на рисунке 24.

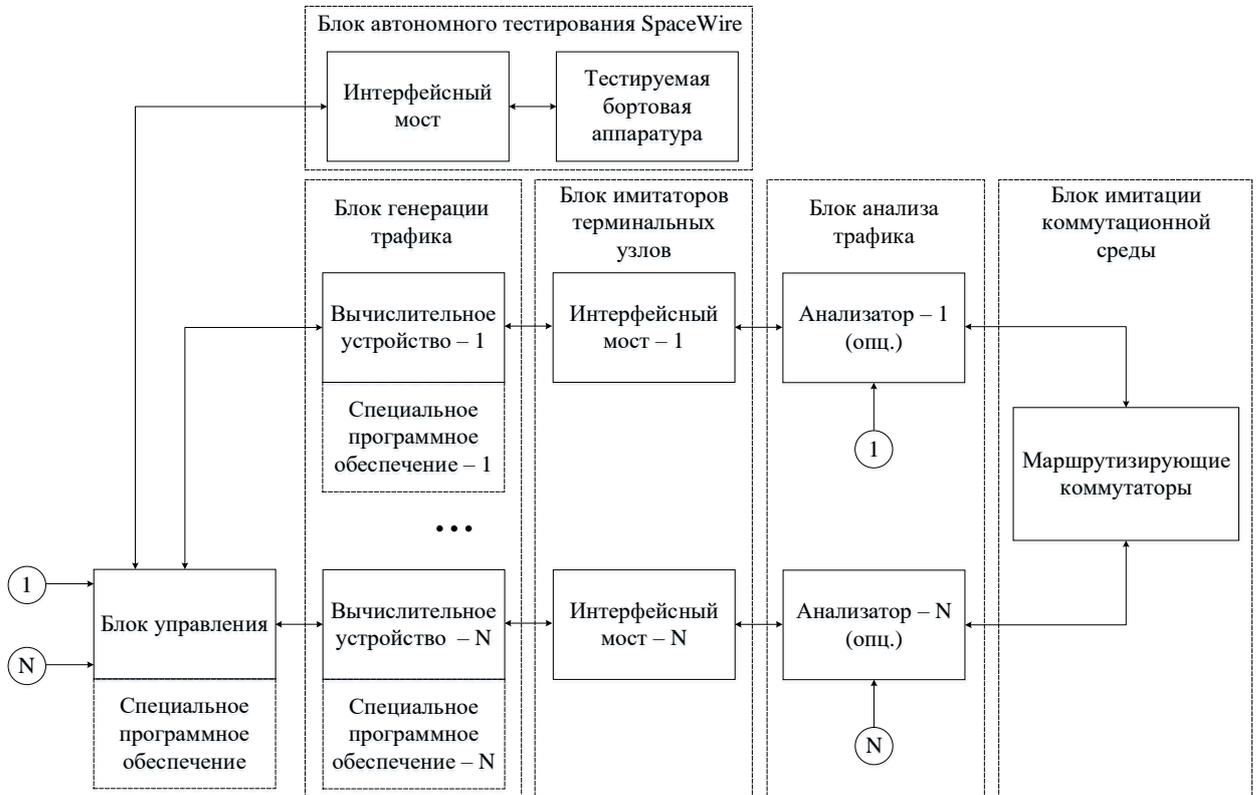


Рисунок 24 – Структура комплекса моделирования

Рассматриваются функциональные характеристики каждого отдельного блока из состава комплекса моделирования:

1) Блок управления представляет собой вычислительное устройство с реализованным на нем СПО. С данным блоком непосредственно взаимодействует оператор комплекса моделирования. Блок отвечает за широкий спектр задач, среди которых в качестве основных выделяются:

- формирование и передача конфигураций на элементы блока генерации трафика, блока имитаторов терминальных узлов, блока имитации коммутационной среды перед запуском моделирования;

- запуск и остановка процесса моделирования работы системы;

– сбор и обработка информации, полученной от элементов блока анализа трафика после проведения моделирования работы системы.

2) Блок генерации трафика является блоком, который отвечает за формирование и передачу, прием и обработку данных, в соответствии с конфигурациями, полученными от блока управления. Блок состоит из вычислительных устройств, с реализованным на них СПО (отличным от СПО блока управления). Количество вычислительных устройств варьируется в зависимости от моделируемого объекта.

3) Блок имитаторов терминальных узлов состоит из интерфейсных мостов. Количество интерфейсных мостов соответствует количеству вычислительных устройств блока генерации трафика. Блок отвечает за связь интерфейсов элементов блока генерации трафика и блока имитации коммутационной среды. Элементы блоков генерации трафика и имитаторов терминальных узлов образуют модели конечных узлов. Каждая пара вычислительного устройства и интерфейсного моста способна моделировать работу до восьми конечных узлов (обуславливается количеством портов выбранных интерфейсных мостов).

4) Блок анализа трафика состоит из анализаторов. Блок отвечает за запись передаваемых данных вместе с установкой временных меток в процессе моделирования работы системы и передачу записанной информации в блок управления для дальнейшей обработки. Подключение анализаторов осуществляется в каналах, выделенных оператором комплекса моделирования для анализа. Подключение анализаторов в каждый канал не целесообразно, т.к. ведет к резкому увеличению стоимости разработки. В случае необходимости записи данных, проходящих через каналы, число которых превышает возможности подключения имеющихся анализаторов, следует провести несколько запусков моделирования, перед каждым из которых осуществлять переподключение анализаторов в другие каналы.

5) Блок имитации коммутационной среды состоит из маршрутизирующих коммутаторов. Блок отвечает за организацию требуемой

инфраструктуры системы. Перед непосредственным проведением моделирования каждый маршрутизирующий коммутатор конфигурируется посредством записи информации в строки таблицы маршрутизации [82].

б) Блок автономного тестирования SpaceWire представляет собой интерфейсный мост, к которому подключается тестируемая бортовая аппаратура. Ранее отмечалось, что в случае применения аппаратно-программного моделирования допускается проведение тестирования отдельных элементов системы. С помощью интерфейсного моста обеспечивается возможность проведения проверок на соответствие требованиям стандарта SpaceWire, а также требованиям стандартов транспортных протоколов, работающих совместно со SpaceWire. Кроме того, тестируемая бортовая аппаратура может быть подключена к собранной модели системы [83].

3.2. Разработка алгоритмов функционирования комплекса моделирования.

Логика функционирования комплекса моделирования определяется исходя из разработанных для него алгоритмов, т.е. комплексов строгих последовательностей действий, отвечающих типовым требованиям эффективности, определенности и конечности [84]. Алгоритмы относятся к процессам функционирования модели системы на базе SpaceWire и анализа информационного взаимодействия. Описание алгоритмов представлено в виде блок-схем [85].

3.2.1. Разработка алгоритмов функционирования модели системы на базе SpaceWire.

Функционирование модели системы на базе SpaceWire организуется с помощью алгоритмов, относящихся к работе всей системы, а также к работе ее отдельных элементов, представленных оконечными узлами. Алгоритмы работы маршрутизирующих коммутаторов не рассматриваются, поскольку они являются типовыми и уже реализованными для выбранных в ходе разработки структуры системы моделирования образцов. В процессе

разработки алгоритмов используются существующие знания и методы предметных подходов, а также опыт аналогичных разработок. Одновременно с этим, разрабатываемые алгоритмы направлены на решение задачи по обработке информации о работе систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА с целью обеспечения необходимого уровня подобия модели и объекта моделирования и имитации условий функционирования объекта моделирования. Таким образом, описываемый комплекс моделирования может рассматриваться в качестве следующего этапа развития подобных технических решений.

Общий алгоритм функционирования модели системы на базе SpaceWire описывается блок-схемой, представленной на рисунке 25.

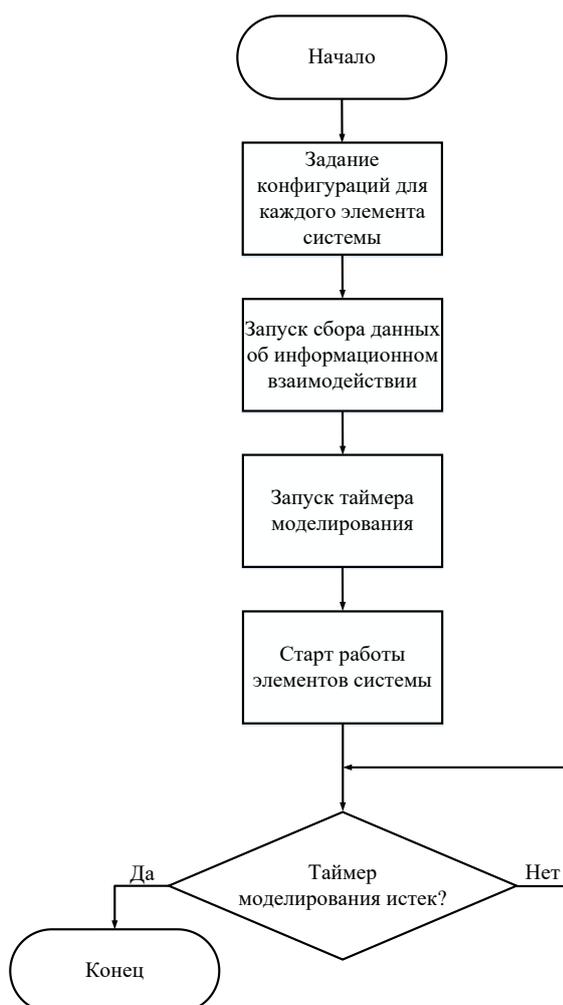


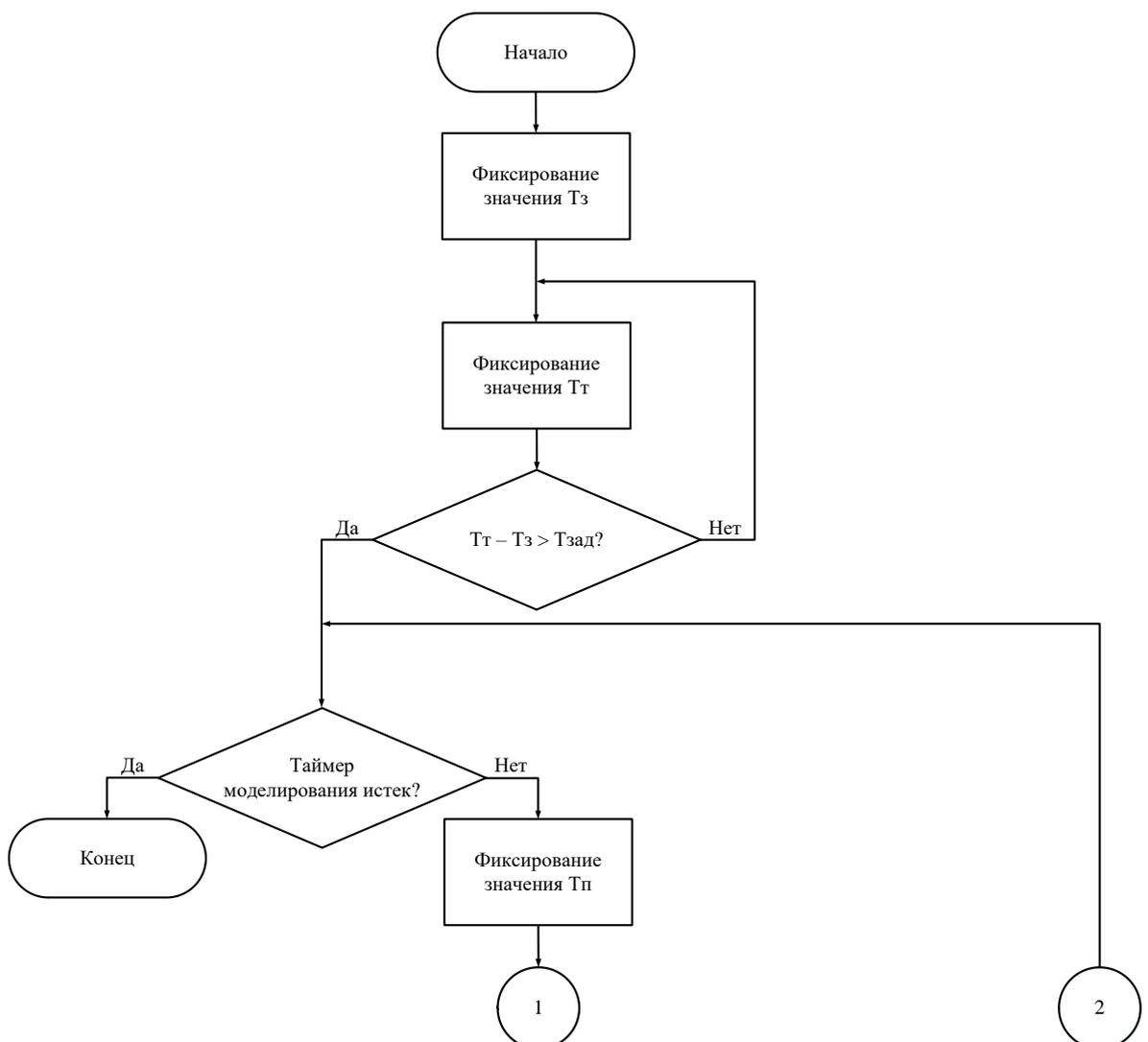
Рисунок 25 – Блок-схема алгоритма функционирования модели системы на базе SpaceWire

3.2.1.1. Алгоритм работы конечного узла (информационного потока).

С помощью алгоритма работы конечного узла описывается его функционирование, заключающееся в передаче, приеме и обработке данных для заданного числа информационных потоков. Алгоритм работы конечного узла состоит из множества отдельных алгоритмов, относящихся к работе их информационных потоков, каждый из которых, в свою очередь, функционирует в соответствии с алгоритмами передатчика и приемника.

3.2.1.1.1. Алгоритм работы передатчика.

Структура алгоритма описывается блок-схемой, представленной на рисунке 26.



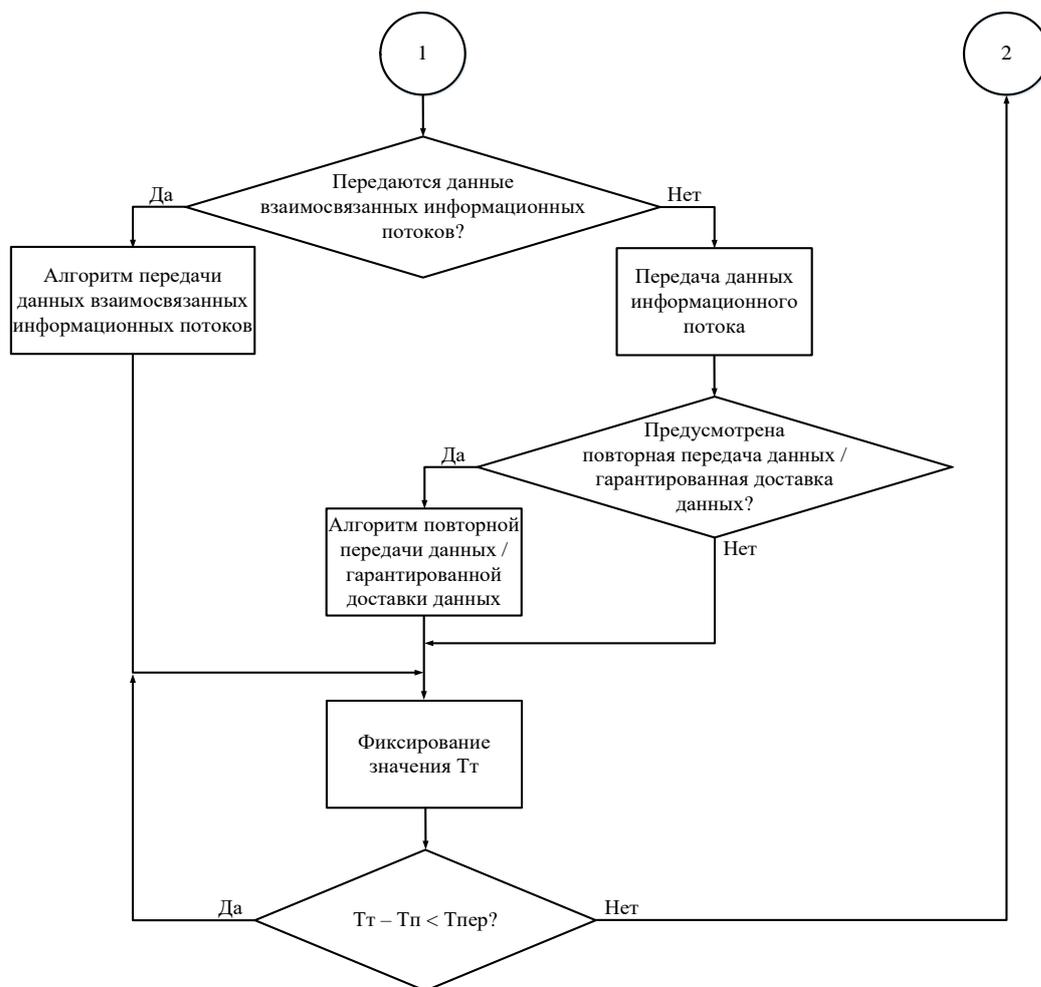


Рисунок 26 – Блок-схема алгоритма работы передатчика:
 T_t – текущее время; T_z – время запуска моделирования; $T_{зад}$ – задержка передачи данных;
 $T_{п}$ – время передачи данных; $T_{пер}$ – период передачи данных

В ходе разработки требований к комплексу моделирования отмечалось, что некоторые информационные потоки обладают взаимосвязью, из чего следует, что передатчики таких информационных потоков работают иначе, нежели передатчики одиночных информационных потоков. Данная особенность учтена в представленном алгоритме – взаимосвязанные и одиночные информационные потоки обрабатываются по-разному.

Передача данных из состава одиночных информационных потоков не обладает какими-либо существенными отличительными особенностями. Для полноты представления приводится алгоритм повторной передачи данных, используемый в случае применения транспортного протокола RMAP с

требованием ответа. Структура алгоритма описывается блок-схемой, представленной на рисунке 27.

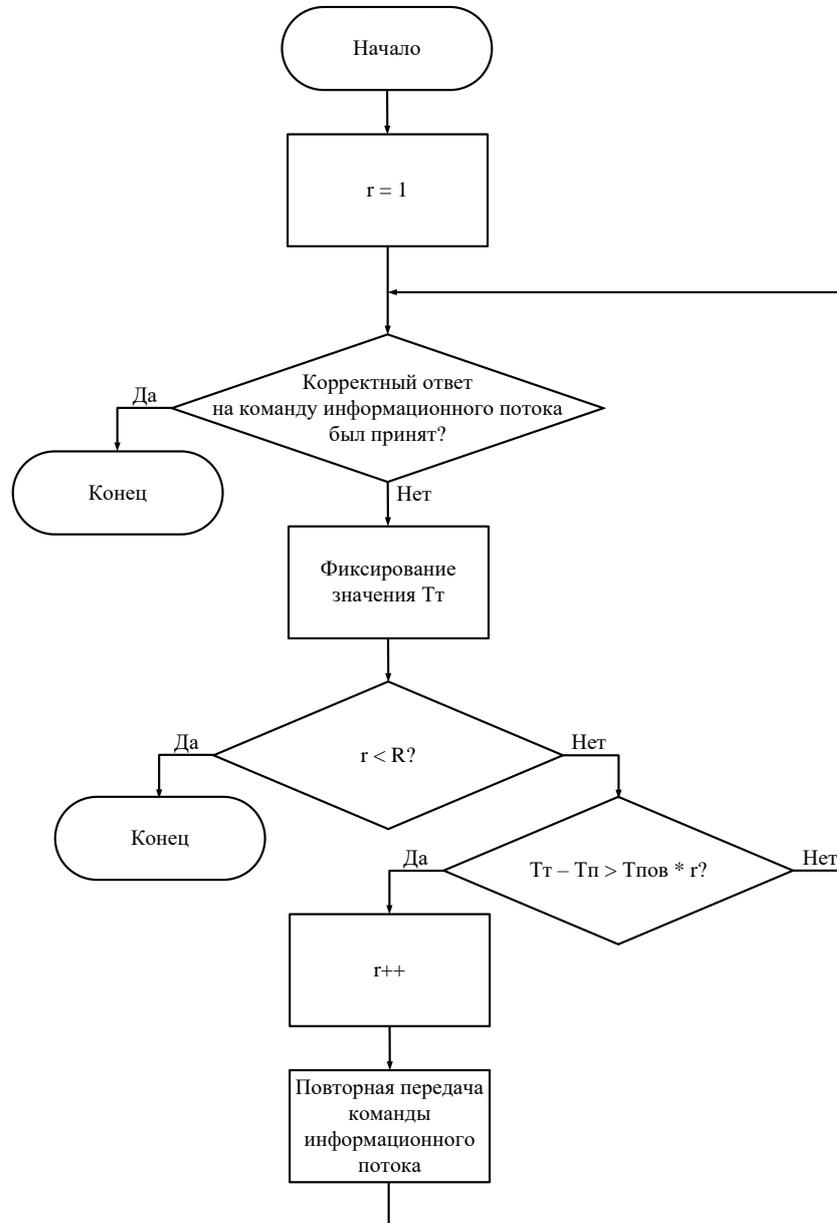


Рисунок 27 – Блок-схема алгоритма повторной передачи данных (RMAP):
 T_t – текущее время; T_p – время передачи данных; R – максимальное количество передач; r – текущее количество передач; $T_{пов}$ – таймер повтора

Для полноты представления приводится алгоритм гарантированной доставки данных, используемый в случае применения транспортного протокола СТП-ИСС с запросом подтверждения. Структура алгоритма описывается блок-схемой, представленной на рисунке 28.

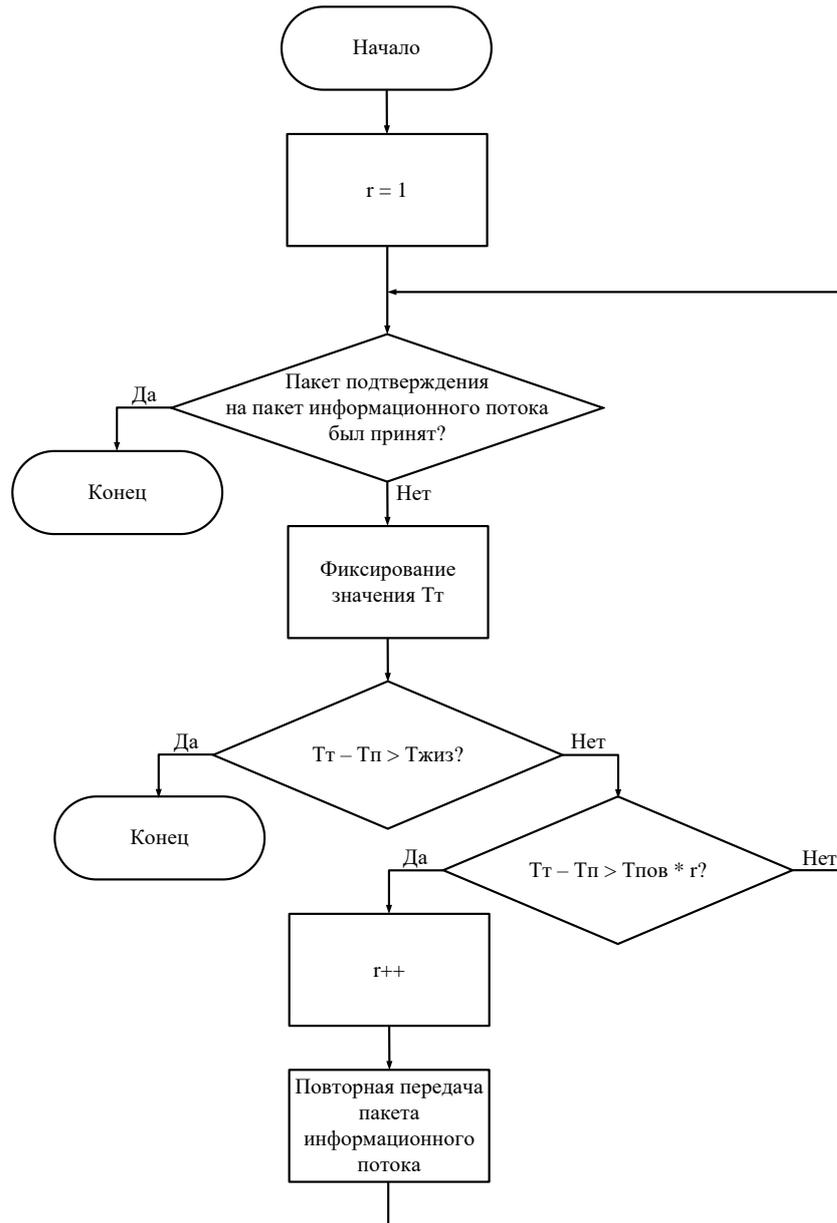
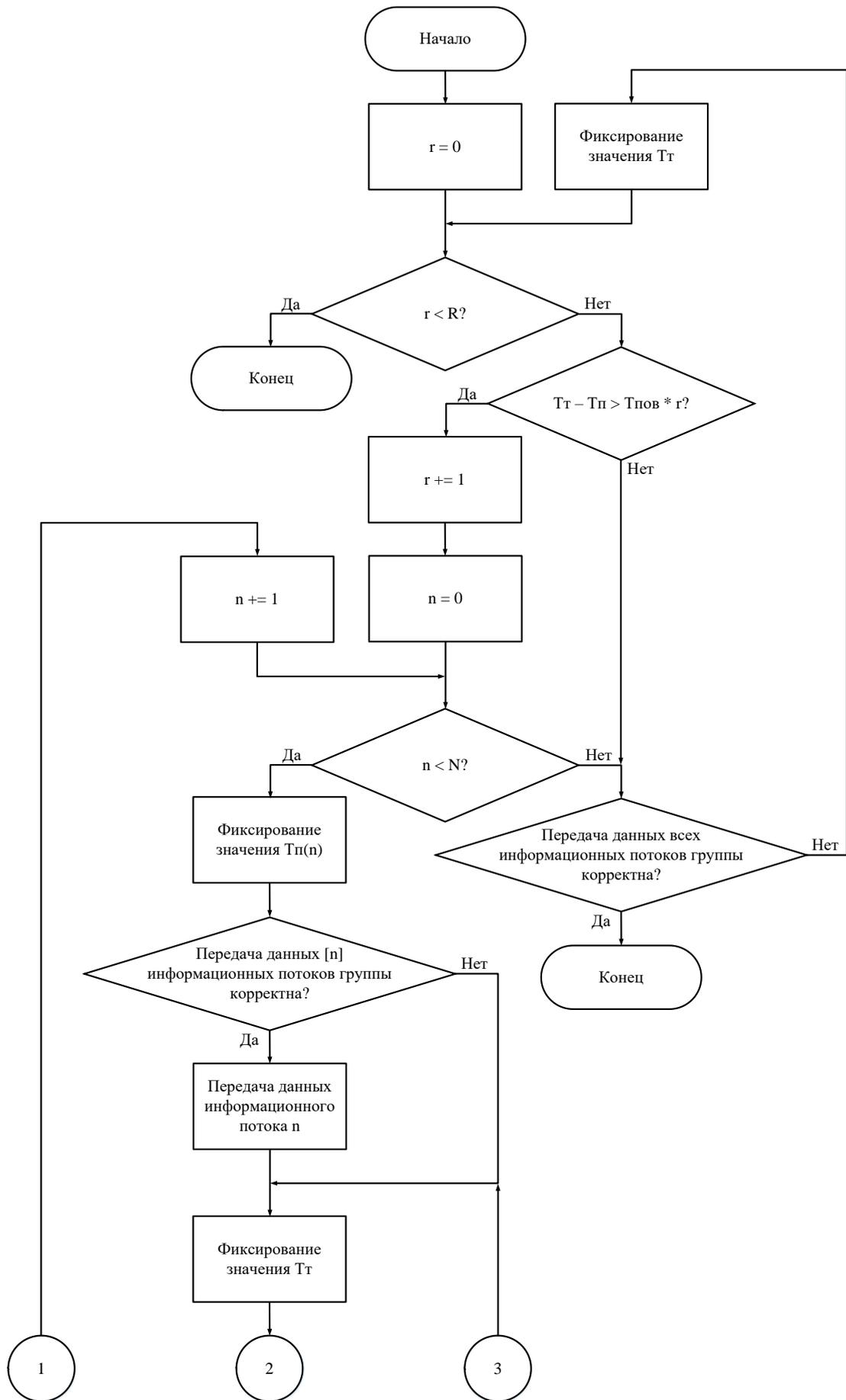


Рисунок 28 – Блок-схема алгоритма гарантированной доставки данных (СТП-ИСС):
 T_t – текущее время; T_p – время передачи данных; $T_{пов}$ – таймер времени жизни пакета; r –
 текущее число передач; $T_{пов}$ – таймер повтора

Передача данных из состава взаимосвязанных информационных потоков, напротив, имеет ряд особенностей, вследствие чего для нее выделяется отдельный алгоритм. Структура алгоритма описывается блок-схемой, представленной на рисунке 29.



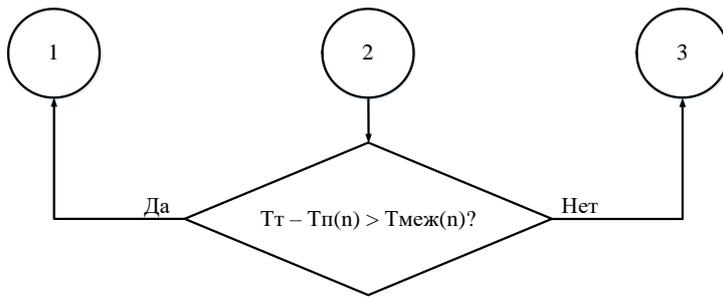


Рисунок 29 – Блок-схема алгоритма передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков:

T_T – текущее время; T_P – время передачи данных; N – общее число информационных потоков группы; n – текущий номер информационного потока группы; $T_{П(n)}$ – время передачи данных из состава информационного потока n ; $[n]$ – список информационных потоков группы, корректная передача данных из состава которых определяет допустимость передачи данных из состава информационного потока n ; $T_{Меж(n)}$ – задержка между передачей данных из состава информационных потоков n и $n + 1$; R – максимальное число передач данных из состава информационных потоков группы; r – текущее число передач данных из состава информационных потоков группы; $T_{пов}$ – таймер повтора

Предлагается решение, согласно которому взаимосвязанные информационные потоки объединяются в группу численностью N . Каждому информационному потоку группы присваивается порядковый номер n . Обработка информационных потоков группы осуществляется последовательно в соответствии с порядковым номером:

- передача данных из состава информационного потока n осуществляется только в том случае, если соблюдено условие, которым является корректная передача данных (и ответов на них) из состава списка определенных информационных потоков группы $[n]$. Порядковые номера таких информационных потоков задаются в качестве параметра конфигурации информационного потока n ;

- переход к обработке следующего информационного потока группы осуществляется по истечении задержки $T_{Меж(n)}$, задающейся в качестве параметра конфигурации информационного потока n .

Обработка информационных потоков группы осуществляется до тех пор, пока не будет обработан последний из них. Все обозначенные шаги осуществляются во внешнем цикле, в случае если для группы

информационных потоков определена повторная передача. Условиями выхода из цикла и, соответственно, завершения данного алгоритма является:

– корректная передача данных (и ответов на них) из состава всех информационных потоков группы;

– достижение числа попыток передачи данных из состава информационных потоков группы r предельного значения R , задающегося в качестве параметра конфигурации.

Следует отметить, что алгоритм не предполагает применение транспортного протокола СТП-ИСС.

3.2.1.1.2. Алгоритм работы приемника.

Структура алгоритма описывается блок-схемой, представленной на рисунке 30.

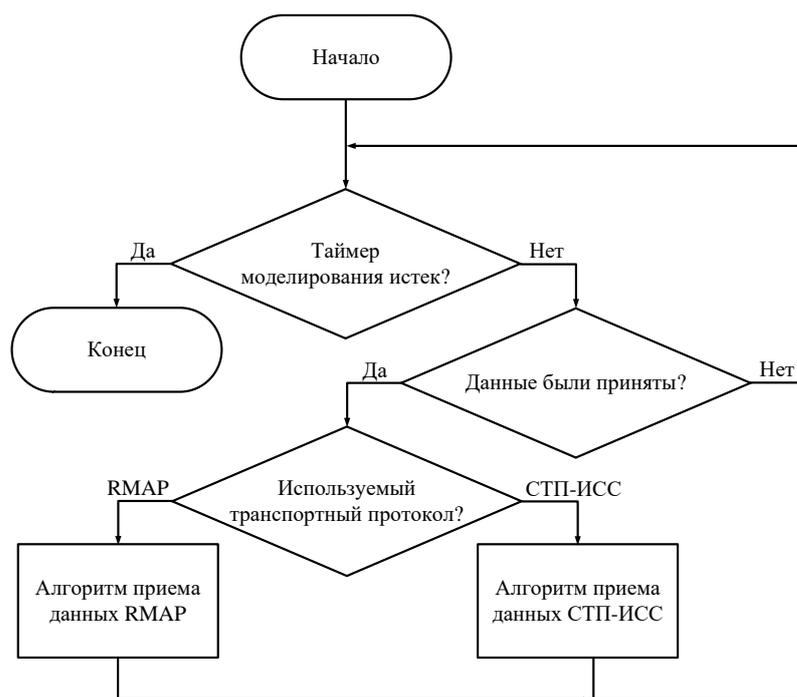


Рисунок 30 – Блок-схема алгоритма работы приемника

Структуры алгоритмов приема данных RMAP и СТП-ИСС описываются с блок-схемами, представленными на рисунках 31 и 32, соответственно.

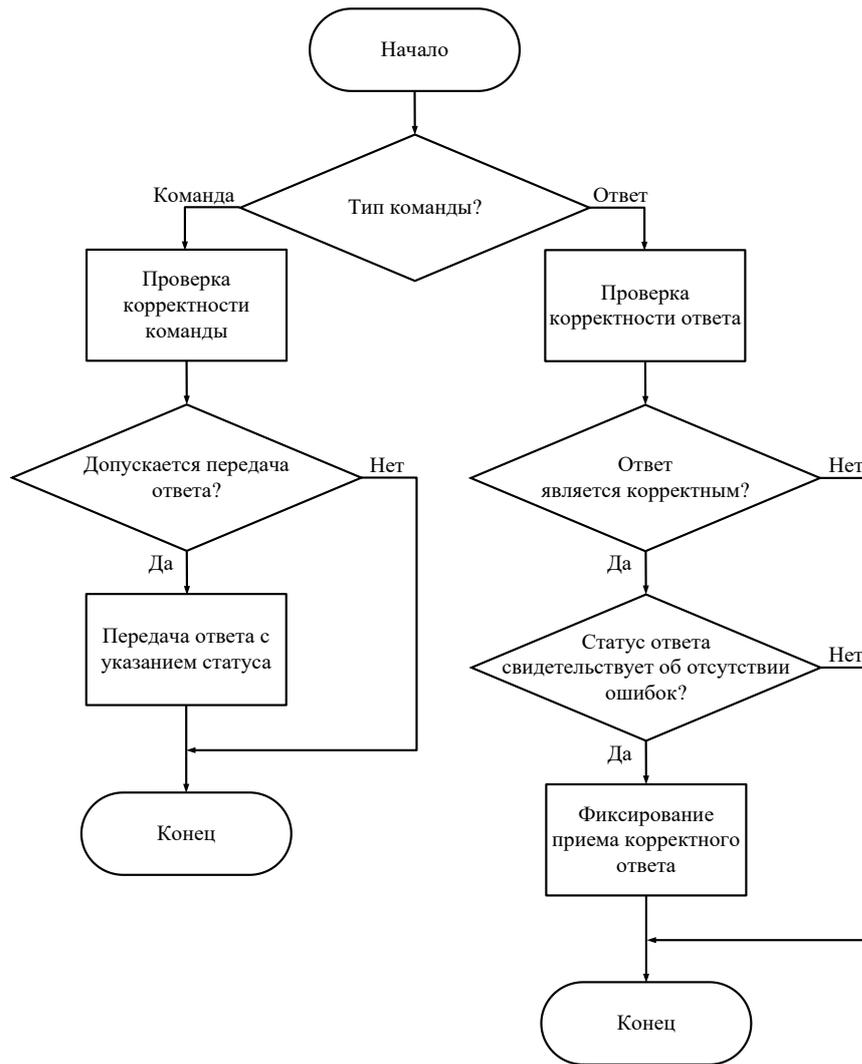
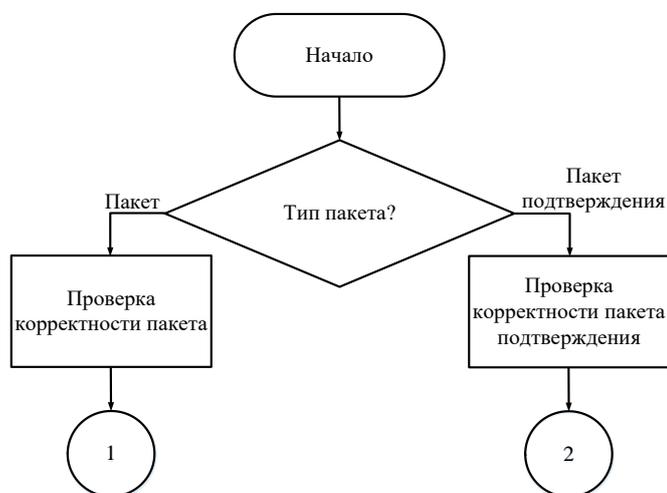


Рисунок 31 – Блок-схема алгоритма приема данных RMAP



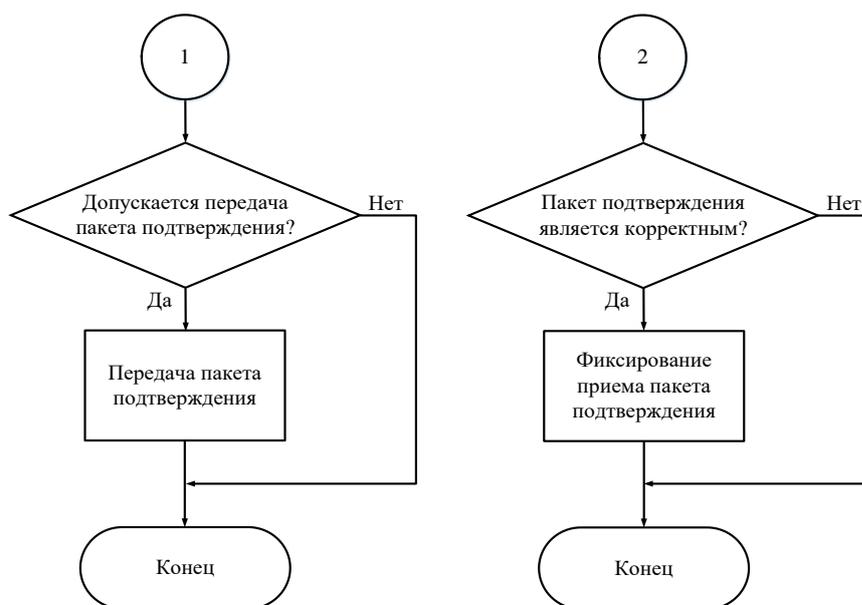


Рисунок 32 – Блок-схема алгоритма приема данных СТП-ИСС

3.2.1.2. Алгоритм передачи данных по запросу.

В ходе разработки требований к комплексу моделирования отмечалась необходимость организации передачи данных по запросу в случае, если для информационных потоков, в составе которых передаются эти данные, определено соответствующее условие. Для решения задачи следует, прежде всего, охарактеризовать процесс возникновения запросов.

Запросы представляют собой управляющие воздействия с НКУ, передающиеся в двух режимах – с помощью типовых работ и отдельных команд. Типовые работы представляют собой перечни управляющих воздействий, передающиеся в соответствии с разрабатываемыми планами. Отдельные команды передаются в режиме ручного управления КА.

Из представленной информации следует, что в случае выдачи управляющих воздействий на КА с помощью типовых работ организация передачи данных по запросу может быть осуществлена с помощью задания периода передачи данных. Однако в случае выдачи управляющих воздействий на КА с помощью одиночных команд, как правило, невозможно выделить постоянный период.

Предлагается определять данный процесс как простейший или стационарный пуассоновский процесс, для которого число возникающих запросов в единицу времени соответствует распределению Пуассона:

$$P(m) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

– где λ – математическое ожидание количества возникающих запросов в единицу времени;

– m – количество возникающих запросов в единицу времени [86].

Для информационных потоков, данные из состава которых передаются по запросу, задаются параметры конфигурации: единица времени $T_{\text{ед}}$ и соответствующее ей значение математического ожидания λ (определение данных параметров предлагается осуществлять на основании экспертной оценки). Последовательность моментов времени возникновения запросов $T_{\text{зап}(i)}$ ($i = 1, 2, \dots$) определяется исходя из следующих соображений:

– вероятность того, что в течение некоторого времени τ не возникнет ни одного запроса, определяется как:

$$P(0) = \frac{(\lambda \tau)^0}{0!} e^{-\lambda \tau} = e^{-\lambda \tau} \quad (2)$$

– из полученной формулы выражается τ :

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln P(0) \quad (3)$$

– по своему смыслу P соответствует независимой равномерно распределенной на отрезке $[0, 1]$ случайной величине r . Исходя из этого выражение для τ принимает вид:

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln r \quad (4)$$

– значение r определяется с помощью генератора случайных чисел [87], после чего вычисляется значение τ . Моменты времени возникновения запросов $T_{\text{зап}(i)}$ определяются как:

$$T_{\text{зап}(i)} = T_{\text{зап}(i-1)} + \tau \quad (5)$$

– $T_{\text{зап}(0)}$ принимается равным нулю. Определение значений $T_{\text{зап}(i)}$ осуществляется до тех пор, пока очередное значение $T_{\text{зап}(i)}$ не превысит время моделирования.

С помощью полученной последовательности моментов времени возникновения запросов $T_{\text{зап}(i)}$ определяется функционирование передатчика информационного потока в соответствии с рисунком 26 – для информационных потоков с соответствующим условием передачи данных значения $T_{\text{зап}(i)}$ заменяют значение $T_{\text{пер}}$.

3.2.1.3. Алгоритм оценки искажений в передаваемых данных.

На этапе разработки требований к комплексу моделирования отмечалась необходимость имитации возникновения искажений в передаваемых данных во время моделирования. Для решения данной задачи следует, прежде всего, охарактеризовать процесс возникновения искажений. Искажения возникают вследствие влияния на передаваемые данные посторонних воздействий – шумов. Предлагается в качестве шумов, оказывающих наибольшее влияние, рассматривать факторы космического пространства, т.е. различные заряженные частицы, способные (при соблюдении ряда условий) вызывать искажения передаваемых данных. Среди заряженных частиц выделяют:

- потоки протонов и электронов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ);

- потоки протонов и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ).

Каждый тип заряженной частицы оказывает различное влияние в зависимости от орбиты, на которой находится КА, текущего периода солнечной активности и пр [88]. Следовательно, рассмотрение влияния каждого типа заряженной частицы необходимо осуществлять отдельно.

Частоты возникновения искажений в передаваемых данных, обусловленные влиянием заряженных частиц, определяются с помощью

методик расчета радиационных условий и измеряются в бит/с или бит/сут [89]. Необходимо отметить, что частоты определяются для каждого отдельного элемента распределенной бортовой системы, стоящего на маршруте следования данных, что обуславливается, разной устойчивостью данных элементов к влиянию заряженных частиц. Типовой маршрут следования данных иллюстрируется рисунком 33.

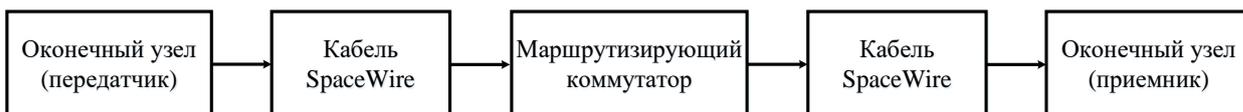


Рисунок 33 – Типовой маршрут следования данных

Как было заявлено выше, частоты возникновения искажений рассчитываются для временного промежутка равного одной секунде. При этом время, в течение которого передаваемые данные находятся в распоряжении того или иного элемента системы не равно одной секунде и не равно некоторому общему для всех элементов значению.

Комплекс моделирования реализует алгоритм позволяющий определить математическое ожидание номера искажаемого бита в передаваемых данных из состава информационного потока (μ). Алгоритм учитывает влияние каждого типа заряженной частицы. Исходными данными, обрабатываемыми алгоритмом, являются значения, полученные с помощью методик расчета радиационных условий и общие сведения о механизмах функционирования элементов системы:

- частоты возникновения искажений в передаваемых данных, возникающие при их прохождении через каждый элемент, стоящий на маршруте следования данных (за одну секунду);
- временные промежутки, в течение которых данные находятся в распоряжении элементов, стоящих на маршруте следования данных.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 34.

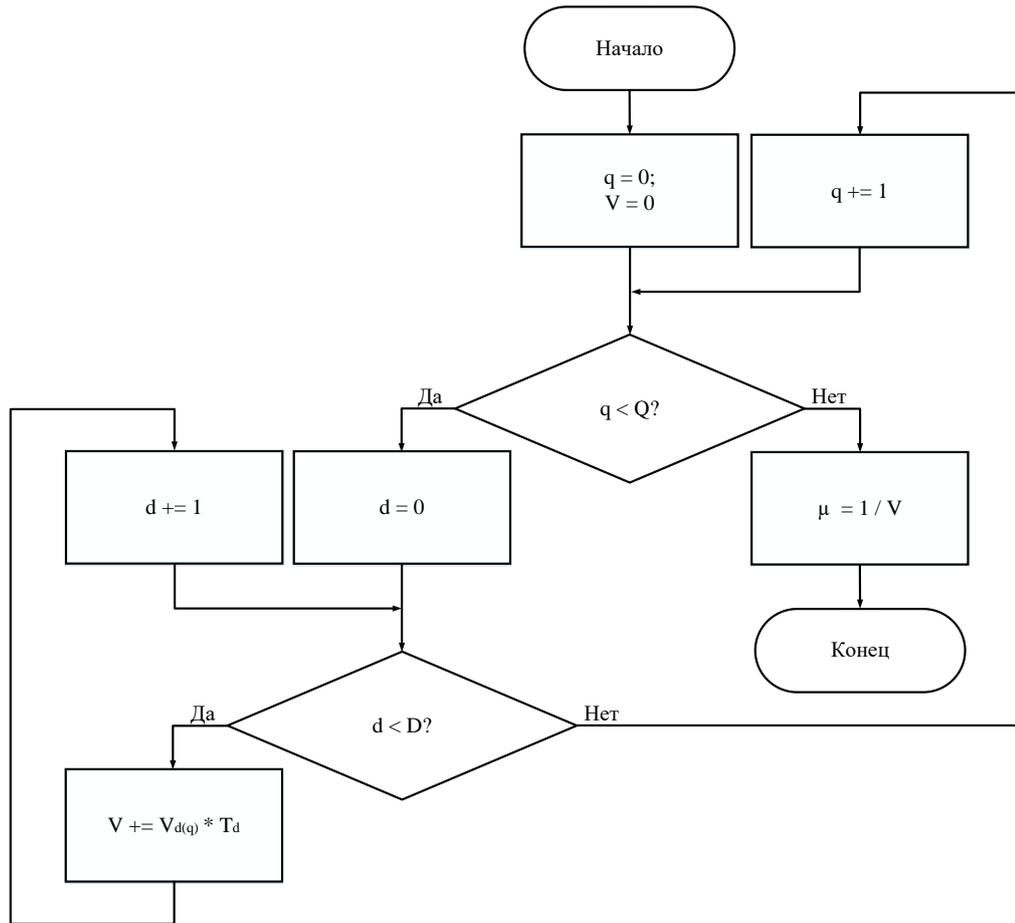


Рисунок 34 – Блок-схема алгоритма расчета μ :

Q – общее количество типов заряженных частиц; q – текущий порядковый номер типа заряженной частицы; D – общее количество элементов, стоящих на маршруте следования данных; d – текущий порядковый номер элемента, стоящего на маршруте следования данных; V – общая частота возникновения искажений данных для всех элементов, стоящих на маршруте следования данных; $V_{d(q)}$ – частота возникновения искажений данных, находящихся в распоряжении элемента d (отдельная для каждого q); T_d – время, в течение которого данные находятся в распоряжении элемента d

В качестве альтернативы данному алгоритму комплекс моделирования предоставляет возможность задания значения μ напрямую (грубая оценка). После получения значения μ комплекс моделирования реализует еще один алгоритм, позволяющий определить список номеров бит в передаваемых данных из состава информационного потока, подвергающихся искажениям ($E_{иск}$).

Номера искажаемых бит задаются отстающими друг от друга на некоторую случайную величину, подчиняющуюся нормальному закону

распределения. Дополнительно задается параметр, характеризующий разброс положения искажаемых бит – среднеквадратичное отклонение (σ). Алгоритм реализован таким образом, что параметр σ определяется как некоторая доля от параметра μ , либо же задается равным нулю. Для проведения вычислений применяется преобразование Бокса-Мюллера [90]:

– определяется выражение для независимой и нормально распределенной величины, которая имеет стандартное нормальное распределение с математическим ожиданием равным нулю и дисперсией равной единице:

$$z = \sqrt{-2 \ln r_1} \cos(2\pi r_2) \quad (6)$$

– значения r_1 и r_2 (независимые равномерно распределенные на отрезке $[0, 1]$ случайные величины) определяются с помощью генератора случайных чисел, после чего вычисляется значение z ;

– число, подчиняющееся нормальному распределению, вычисляется в соответствии с формулой:

$$x = \mu + \sigma z \quad (7)$$

Из формулы следует, что, если параметр σ задается равным нулю, номера искажаемых бит имеют постоянный период, который равен μ .

Искажения в передаваемые данные вносятся следующим образом. Задается цикл, в котором определяются места включения искажений $E_{иск}$, которые представляют собой порядковый номер бита в общем массиве передаваемых данных из состава информационного потока и вычисляются согласно формуле:

$$E_{иск} = E_{иск} + x \quad (8)$$

Изначальное значение $E_{иск}$ принимается равным нулю. Определение значений $E_{иск}$ осуществляется до тех пор, пока очередное значение $E_{иск}$ не превысит весь объем данных N_{lim} , который передается информационным потоком. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 35.

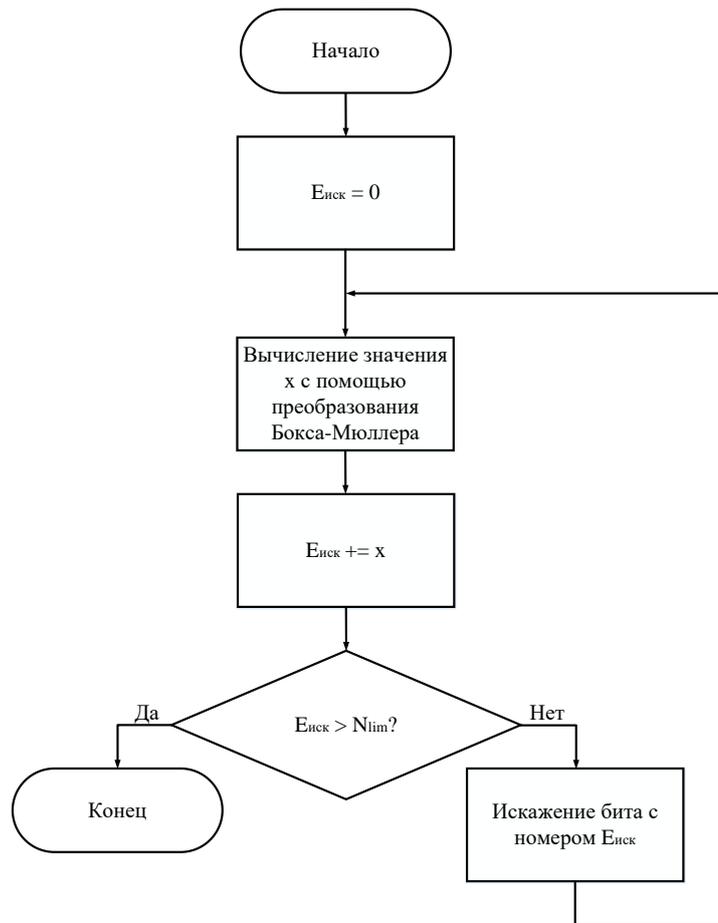


Рисунок 35 – Блок-схема алгоритма расчета $E_{иск}$

3.2.2. Разработка алгоритмов анализа информационного взаимодействия.

По завершении процесса моделирования осуществляется анализ информационного взаимодействия, обеспечивающий определение характеристик информационных потоков. Зафиксированные с помощью анализаторов данные, которым в соответствии установлены временные метки, являются основой для дальнейшего процесса обработки с помощью разработанного СПО [91] [92]. В ходе первичной обработки определяется следующая информация:

1) Для каждого пакета данных из состава информационного потока определяется:

- факт передачи пакета узлом-передатчиком ($\Phi_{пер}$);

- факт приема пакета узлом-приемником ($\Phi_{\text{при}}$);
- факт установления соответствия данных, содержащихся в пакете, переданном узлом-передатчиком, и данных, содержащихся в пакете, принятом узлом-приемником ($\Phi_{\text{соотв}}$);
- длина данных пакета (без учета дополнительных бит кодирования и байт служебных данных), переданного узлом-передатчиком (L);
- время передачи первого байта пакета узлом-передатчиком ($T_{\text{пер}}$);
- время приема символа EOP или EEP узлом-приемником ($T_{\text{при}}$).

2) Для каждой команды RMAP из состава информационного потока определяется:

- факт приема служебного пакета узлом-передатчиком ($\Phi_{\text{при(RMAP)}}$);
- факт установления соответствия данных, содержащихся в служебном пакете, переданном узлом-приемником, и данных, содержащихся в служебном пакете, принятом узлом-передатчиком ($\Phi_{\text{соотв(RMAP)}}$);
- время передачи первого байта служебного пакета узлом-приемником ($T_{\text{пер(RMAP)}}$);
- время приема символа EOP или EEP служебного пакета узлом-передатчиком ($T_{\text{при(RMAP)}}$).

Отмечается, что в случае команд записи узлом-передатчиком считается узел, передающий команду. В случае команд чтения узлом-передатчиком считается узел, передающий ответ.

3) Для каждого пакета СТП-ИСС из состава информационного потока определяется:

- факт приема пакета подтверждения узлом-передатчиком ($\Phi_{\text{при(СТП-ИСС)}}$);
- факт установления соответствия данных, содержащихся в пакете подтверждения, переданном узлом-приемником, и данных, содержащихся в пакете подтверждения, принятом узлом-передатчиком ($\Phi_{\text{соотв(СТП-ИСС)}}$);

– время передачи первого байта пакета подтверждения узлом-приемником ($T_{\text{пер(СТП-ИСС)}}$);

– время приема символа EOP или EEP пакета подтверждения узлом-передатчиком ($T_{\text{при(СТП-ИСС)}}$).

В ходе вторичной обработки определяются характеристики каждого отдельного пакета, после чего с помощью описываемых далее расчетов аналогичные характеристики определяются для информационных потоков.

3.2.2.1. Общие характеристики.

1) Задержка передачи данных. Данная характеристика для отдельного пакета определяется в случае, если для него установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при}}$ и $\Phi_{\text{соотв}}$. Значение задержки передачи данных пакета (D) определяется разностью значений $T_{\text{при}}$ и $T_{\text{пер}}$:

$$D = T_{\text{при}} - T_{\text{пер}} \quad (9)$$

Для информационного потока определяется средняя задержка передачи данных (сумма значений задержек передачи данных отдельных пакетов делится на общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при}}$ и $\Phi_{\text{соотв}}$):

$$D_{(\text{ср})} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{при}(i)} - T_{\text{пер}(i)} \quad (10)$$

где n – общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при}}$ и $\Phi_{\text{соотв}}$.

2) Скорость передачи данных. Данная характеристика для отдельного пакета определяется в случае, если для него установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при}}$ и $\Phi_{\text{соотв}}$. Значение скорости передачи данных пакета (S) определяется делением значения L на разность значений $T_{\text{при}}$ и $T_{\text{пер}}$:

$$S = \frac{L}{T_{\text{при}} - T_{\text{пер}}} \quad (11)$$

Для информационного потока определяется средняя скорость передачи данных (сумма значений скоростей передачи данных отдельных пакетов

делится на общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при}}$ и $\Phi_{\text{соотв}}$):

$$S_{(\text{cp})} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{L_{(i)}}{T_{\text{при}(i)} - T_{\text{пер}(i)}} \quad (12)$$

где n – общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при}}$ и $\Phi_{\text{соотв}}$.

3) Вероятность доставки данных без искажений. Данная характеристика для информационного потока определяется делением значения количества пакетов, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при}}$ и $\Phi_{\text{соотв}}$, на общее количество пакетов в информационном потоке:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{\text{пер}(i)} \cdot \Phi_{\text{при}(i)} \cdot \Phi_{\text{соотв}(i)} \quad (13)$$

где n – общее количество пакетов в информационном потоке.

3.2.2.2. Характеристики, связанные с применением транспортного протокола RMAP.

1) Время выполнения команды. Данная характеристика для отдельного пакета определяется в случае, если для него установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(RMAP)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(RMAP)}}$. Значение времени выполнения команды (D_{RMAP}) определяется суммой следующих составляющих: разность значений $T_{\text{при}}$ и $T_{\text{пер}}$, разность значений $T_{\text{при(RMAP)}}$ и $T_{\text{пер(RMAP)}}$:

$$D_{\text{RMAP}} = (T_{\text{при}} - T_{\text{пер}}) + (T_{\text{при(RMAP)}} - T_{\text{пер(RMAP)}}) \quad (14)$$

Для информационного потока определяется среднее время выполнения команды (сумма значений времени выполнения команды отдельных пакетов делится на общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(RMAP)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(RMAP)}}$):

$$D_{\text{RMAP}(\text{cp})} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{\text{при}(i)} - T_{\text{пер}(i)}) + (T_{\text{при(RMAP)}(i)} - T_{\text{пер(RMAP)}(i)}) \quad (15)$$

где n – общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(RMAP)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(RMAP)}}$.

2) Вероятность выполнения команды без искажений. Данная характеристика для информационного потока определяется делением значения количества пакетов, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(RMAP)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(RMAP)}}$, на общее количество пакетов в информационном потоке:

$$P_{\text{RMAP}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{\text{пер}(i)} \cdot \Phi_{\text{при(RMAP)}(i)} \cdot \Phi_{\text{соотв(RMAP)}(i)} \quad (16)$$

где n – общее количество пакетов в информационном потоке.

3.2.2.3. Характеристики, связанные с применением транспортного протокола СТП-ИСС.

1) Время передачи пакета и подтверждения. Данная характеристика для отдельного пакета определяется в случае, если для него установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(СТП-ИСС)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(СТП-ИСС)}}$. Значение времени передачи пакета и подтверждения ($D_{\text{СТП-ИСС}}$) определяется суммой следующих составляющих: разность значений $T_{\text{при}}$ и $T_{\text{пер}}$, разность значений $T_{\text{при(СТП-ИСС)}}$ и $T_{\text{пер(СТП-ИСС)}}$:

$$D_{\text{СТП-ИСС}} = (T_{\text{при}} - T_{\text{пер}}) + (T_{\text{при(СТП-ИСС)}} - T_{\text{пер(СТП-ИСС)}}) \quad (17)$$

Для информационного потока определяется среднее время передачи пакета и подтверждения (сумма значений времени передачи пакета и подтверждения отдельных пакетов делится на общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(СТП-ИСС)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(СТП-ИСС)}}$):

$$D_{\text{СТП-ИСС(ср)}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{\text{при}(i)} - T_{\text{пер}(i)}) + (T_{\text{при(СТП-ИСС)}(i)} - T_{\text{пер(СТП-ИСС)}(i)}) \quad (18)$$

где n – общее количество пакетов в информационном потоке, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(СТП-ИСС)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(СТП-ИСС)}}$ [93].

2) Вероятность доставки пакета и подтверждения без искажений. Данная характеристика для информационного потока определяется делением значения количества пакетов, для которых установлены факты $\Phi_{\text{пер}}$, $\Phi_{\text{при(СТП-ИСС)}}$ и $\Phi_{\text{соотв(СТП-ИСС)}}$, на общее количество пакетов в информационном потоке:

$$P_{\text{СТП-ИСС}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{\text{пер}(i)} \cdot \Phi_{\text{при(СТП-ИСС)}(i)} \cdot \Phi_{\text{соотв(СТП-ИСС)}(i)} \quad (19)$$

где n – общее количество пакетов в информационном потоке.

Обработанные с помощью представленных алгоритмов данные – значения характеристик информационных потоков, являются конечным результатом работы комплекса моделирования. Эта полученная информация используется конечным потребителем (оператор комплекса моделирования), который на ее основе принимает решения о необходимости внесения корректировок в модель системы на базе SpaceWire (в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3).

3.3. Разработка методики исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

Основным предназначением методики исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов является проведение прикладных статистических исследований, направленных на анализ функционирования систем на базе SpaceWire в условиях изменения параметров информационного взаимодействия. В основе методики лежит применение активного эксперимента (однофакторного) [94]. Процесс проведения исследования с помощью разработанной методики подразделяется на два этапа.

3.3.1. Описание первого этапа проведения исследования.

На первом этапе осуществляется последовательность итераций моделирования и анализа информационного взаимодействия, при которых все конфигурационные параметры комплекса моделирования остаются постоянными за исключением одного параметра, который выбирается в качестве фактора – для него задаются различные значения. Описанный процесс иллюстрируется с помощью схемы, представленной на рисунке 36.



Рисунок 36 – Первый этап исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов:

X – различные параметры конфигурации комплекса моделирования, каждый из которых постоянен (const) для каждой итерации моделирования, за исключением одного выбранного (var); Y – исследуемые характеристики информационных потоков

Задание значений (уровней) конфигурационного параметра, выбранного в качестве фактора («var» на рисунке 36) осуществляется на основании экспертной оценки и состоит из трех этапов:

- выбор нулевого уровня фактора;
- выбор количества уровней фактора;
- выбор интервала варьирования фактора.

Если выбранный в качестве фактора параметр относится к информационным потокам, то его изменения могут задаваться по отношению только к одному или же ко всем информационным потокам. Например, если в качестве фактора выбран объем передаваемых данных, то для него задается:

- нулевой уровень фактора. Исходный объем передаваемых данных из состава информационного(ых) потока(ов);

- количество уровней фактора. Предельное количество изменений объема передаваемых данных из состава информационного(ых) потока(ов);

- интервал варьирования фактора. Объем передаваемых данных, который при прибавке к исходному объему передаваемых данных из состава информационного(ых) потока(ов) образует следующий уровень объема передаваемых данных из состава информационного(ых) потока(ов).

В случае если изменения задаются по отношению ко всем информационным потокам, то начальный уровень фактора и интервал варьирования индивидуальны для каждого отдельного информационного потока.

Блок-схема алгоритма первого этапа исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов представлена на рисунке 37.

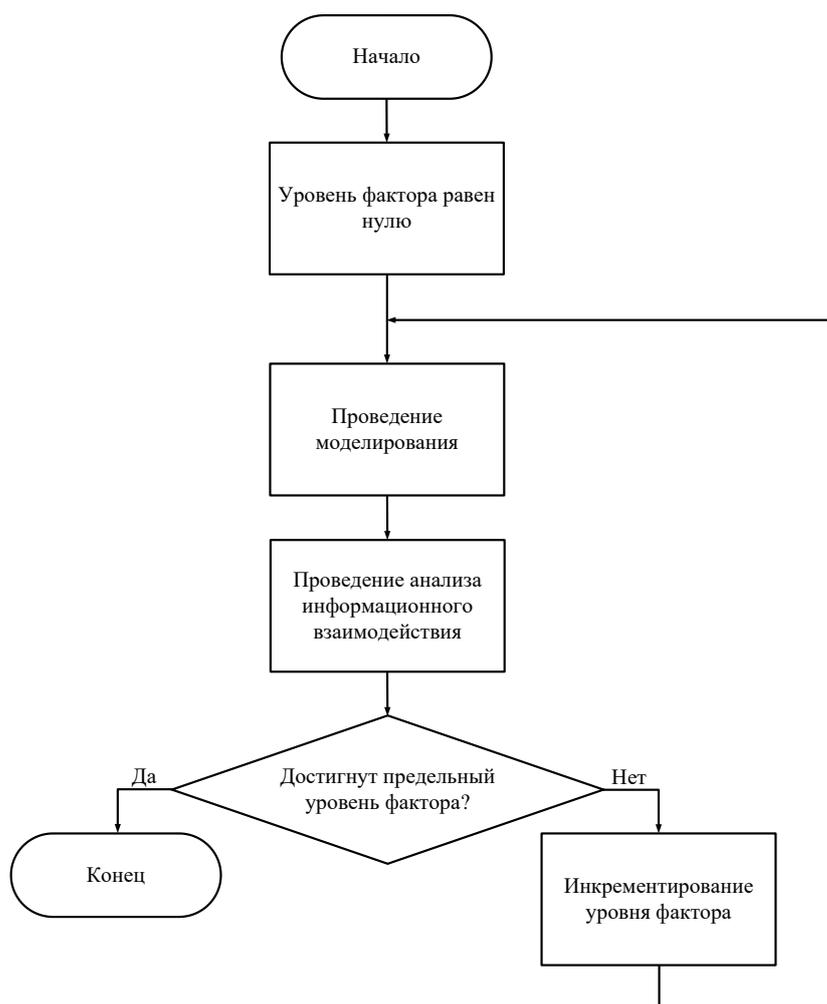


Рисунок 37 – Блок-схема алгоритма первого этапа исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов

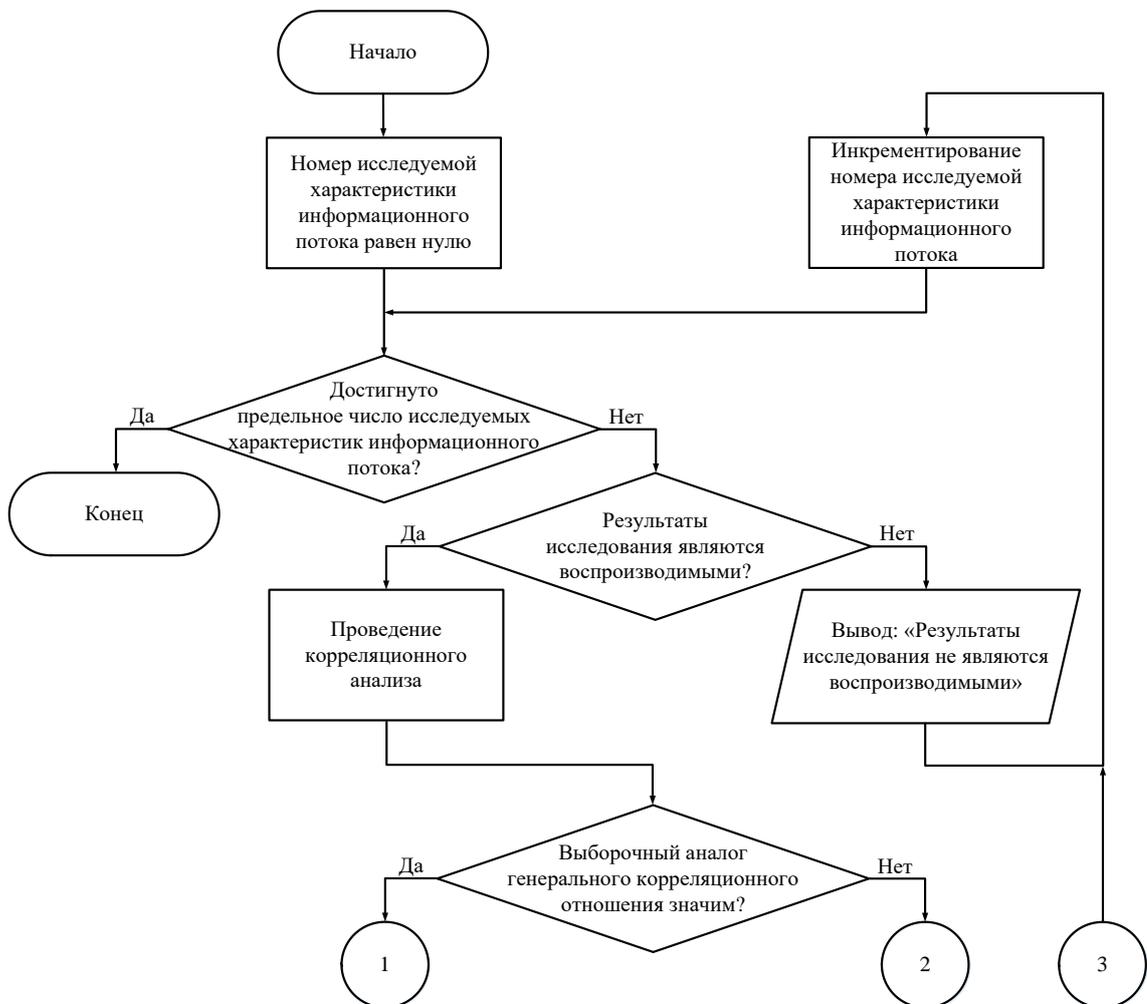
После проведения всех итераций моделирования и анализа информационного взаимодействия каждая исследуемая характеристика

информационного потока подвергается анализу с помощью последовательности операций, описываемых далее.

3.3.2. Описание второго этапа проведения исследования.

Второй этап проведения исследования базируется на применении средств корреляционного и регрессионного анализа, с помощью которых обрабатывается полученная информация о характеристиках информационных потоков.

Блок-схема алгоритма второго этапа исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов представлена на рисунке 38.



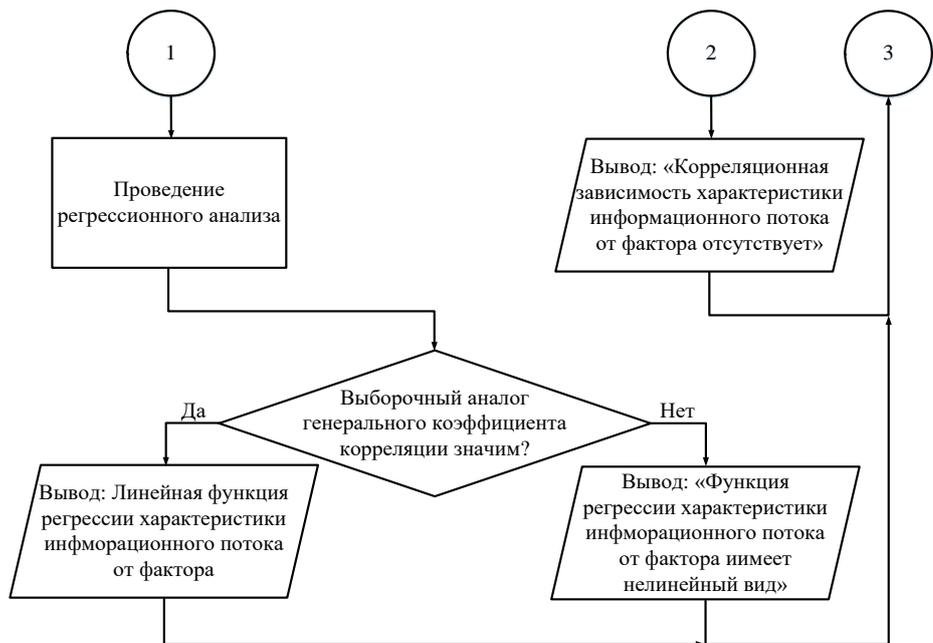


Рисунок 38 – Блок-схема алгоритма исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов

3.3.2.1. Проверка воспроизводимости результатов исследования.

Воспроизводимость результатов – обязательное требование при проведении исследования. Для обеспечения проверки выполнения данного требования проводятся серии параллельных опытов (за серию параллельных опытов принимается множество значений той или иной характеристики информационного потока, полученной для отдельных пакетов в одной итерации моделирования). Результаты опытов отражаются в виде таблицы 15.

Таблица 15 – Результаты серий параллельных опытов

| x_i | Y_{ij} | \bar{Y}_i | $S_{\text{воспр}(i)}^2$ |
|-------|---------------------------------|-------------|-------------------------|
| x_1 | $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1m}$ | \bar{Y}_1 | $S_{\text{воспр}(1)}^2$ |
| x_2 | $Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2m}$ | \bar{Y}_2 | $S_{\text{воспр}(2)}^2$ |
| ... | ... | ... | ... |
| x_n | $Y_{n1}, Y_{n2}, \dots, Y_{nm}$ | \bar{Y}_n | $S_{\text{воспр}(n)}^2$ |

– где u_{ij} – значения результативного признака Y ;

– x_i – значения фактора X ;

- n – число серий параллельных опытов;
- m – число параллельных опытов в серии (значение m постоянно для каждой серии параллельных опытов);
- \bar{y}_i – математическое ожидание значений результативного признака Y для серии параллельных опытов, рассчитываемое согласно формуле:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad (20)$$

- $S_{\text{воспр}(i)}^2$ – дисперсия воспроизводимости для серии параллельных опытов, рассчитываемая согласно формуле:

$$S_{\text{воспр}(i)}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (21)$$

После этого проверяется гипотеза об однородности дисперсий воспроизводимости, полученных для каждой серии параллельных опытов:

$$H_0: S_{\text{воспр}(1)}^2 = S_{\text{воспр}(2)}^2 = \dots = S_{\text{воспр}(n)}^2 \quad (22)$$

Гипотеза проверяется с помощью применения критерия Кохрена. Целесообразность использования данного критерия обуславливается тем, что дисперсии воспроизводимости получены из серий параллельных опытов одинаковых объемов ($m = \text{const}$) [95]. В основе критерия лежит сравнение двух величин: $G_{\text{расч}}$, которая рассчитывается согласно формуле:

$$G_{\text{расч}} = \frac{\max S_{\text{воспр}(i)}^2}{\sum_{i=1}^n S_{\text{воспр}(i)}^2} \quad (23)$$

и $G_{\text{табл}}$, которая определяется исходя из количества степеней свободы максимальной дисперсии воспроизводимости ($f = m - 1$) и суммарной дисперсии воспроизводимости (n) по соответствующей таблице значений для заданного уровня значимости α [96].

В случае если $G_{\text{расч}}$ оказывается меньше $G_{\text{табл}}$, гипотеза H_0 принимается – дисперсии воспроизводимости, полученные в ходе серий параллельных опытов являются однородными. Осуществляется переход к операции корреляционного анализа.

3.3.2.2. Проведение корреляционного анализа.

Как правило, при одном фиксированном уровне фактора результативный признак может принимать случайное значение из некоторого множества. Математическое ожидание данного множества является групповым средним значением результативного признака. В случае если при изменении значений фактора изменяются и групповые средние значения результативного признака, то между данными величинами существует корреляционная зависимость. Процедура определения наличия корреляционной зависимости – корреляционный анализ. Для проведения корреляционного анализа необходимо составление корреляционной таблицы.

3.3.2.2.1. Составление корреляционной таблицы.

Корреляционная таблица заполняется на основании значений вариационных рядов, составленных для фактора и результативного признака. Выбор построения того или иного вида вариационного ряда (дискретного или интервального) основывается на характерных особенностях величин, для которых этот ряд составляется.

Вариационный ряд для фактора является дискретным и заполняется на основании положений, описанных ранее – с помощью экспертной оценки задается область определения уровней фактора с выбором нулевого уровня, количества уровней и интервала варьирования.

Вариационный ряд для результативного признака может являться как дискретным, так и интервальным, что зависит от исследуемой характеристики информационного потока. Для характеристик, связанных с вероятностью доставки данных, это дискретный вариационный ряд (всего два результата – доставлены / не доставлены). Для характеристик, связанных с временем передачи данных, это интервальный вариационный ряд.

Для построения интервального вариационного ряда необходимо определить количество интервалов и их длины. Общим подходом для решения данной задачи является применение формулы Стерджеса, позволяющей определить количество интервалов:

$$k = 1 + 3.322 \cdot \log n \quad (24)$$

– где n – общий объем выборки.

Длины интервалов вычисляются как частное области определения результативного признака и количества интервалов:

$$h = \frac{Y_{\text{наиб}} - Y_{\text{наим}}}{k} \quad (25)$$

– где $Y_{\text{наиб}}$ – наибольшее значение результативного признака;

– $Y_{\text{наим}}$ – наименьшее значение результативного признака [97].

На основе полученных вариационных рядов заполняется корреляционная таблица, которая повсеместно используется в дальнейшем прохождении алгоритма. Корреляционная таблица, заполненная на базе значений составленных вариационных рядов, принимает вид, представленный в таблице 16.

Таблица 16 – Корреляционная таблица

| Результативный признак Y | Фактор X | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|-----------|
| | x_1 | x_2 | ... | x_v | \sum |
| y_1 | m_{11} | m_{12} | ... | m_{1v} | m_1 |
| y_2 | m_{21} | m_{22} | ... | m_{2v} | m_2 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| y_q | m_{q1} | m_{q2} | ... | m_{qv} | m_q |
| \sum | n_1 | n_2 | ... | n_v | n |
| Групповое среднее | $\bar{Y}^{(1)}$ | $\bar{Y}^{(2)}$ | ... | $\bar{Y}^{(v)}$ | \bar{Y} |

– где y_j – значения Y из вариационного ряда;

– x_i – значения X из вариационного ряда;

– q – число групп вариационного ряда Y ;

– v – число групп вариационного ряда X ;

– m_{ji} – частоты попаданий значений выборки в определенные интервалы Y и X ;

– n_i – объем выборки при одном значении X ;

– n – общий объем выборки по всем значениям X ;

– $\bar{Y}^{(i)}$ – групповые средние значения Y , рассчитываемые согласно формуле:

$$\bar{Y}^{(i)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Y_j^{(i)} \quad (26)$$

– где $Y_j^{(i)}$ – j -ое значение Y при i -ом значении X .

– \bar{Y} – общее среднее значение Y , рассчитываемое согласно формуле:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^v \bar{Y}^{(i)} n_i \quad (27)$$

3.3.2.2.2. Вычисление выборочного аналога генерального корреляционного отношения.

Выборочный аналог генерального корреляционного отношения характеризует степень стохастической зависимости величины Y от X и может быть вычислен по формуле:

$$\hat{\rho}_{Y/X} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_\phi^2}{\hat{\sigma}_o^2}} \quad (28)$$

– где $\hat{\sigma}_\phi^2$ – выборочная дисперсия значений Y , которая связана с влиянием на нее X . Рассчитывается согласно формуле:

$$\hat{\sigma}_\phi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^v (\bar{Y}^{(i)} - \bar{Y})^2 n_i \quad (29)$$

– $\hat{\sigma}_o^2$ – выборочная дисперсия значений Y , которая связана с влиянием на нее остаточных факторов. Рассчитывается согласно формуле:

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^q (y_j - \bar{Y}^{(i)})^2 m_{ji} \quad (30)$$

3.3.2.2.3. Проверка значимости выборочного аналога генерального корреляционного отношения. Дисперсионный анализ.

В связи с тем, что значение генерального корреляционного отношения может быть получено только по выборочным данным, то возможно, что для

генеральной совокупности это значение равно нулю, т.е. будет наблюдаться отсутствие значимости величины $\rho_{Y/X}$. Для доказательства или опровержения этого положения следует осуществить проверку гипотезы:

$$H_0: \rho_{Y/X} = 0 \quad (31)$$

Гипотеза проверяется при помощи дисперсионного анализа, основным тождеством при проведении которого является:

$$\hat{\sigma}_Y^2 = \hat{\sigma}_\Phi^2 + \hat{\sigma}_0^2 \quad (32)$$

– где $\hat{\sigma}_Y^2$ – общая выборочная дисперсия значений Y.

Таблица однофакторного дисперсионного анализа в данном случае принимает вид, представленный в таблице 17.

Таблица 17 – Таблица однофакторного дисперсионного анализа (корреляционный анализ)

| Источник вариации величины Y | Показатель вариации | Число степеней свободы | Несмещенная оценка дисперсии |
|------------------------------|-----------------------|------------------------|--|
| Фактор X | $\hat{\sigma}_\Phi^2$ | $v - 1$ | $s_\Phi^2 = \frac{\hat{\sigma}_\Phi^2 n}{v - n}$ |
| Остаточные факторы | $\hat{\sigma}_0^2$ | $n - v$ | $s_0^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2 n}{n - v}$ |
| Общая вариация | $\hat{\sigma}_Y^2$ | $n - 1$ | $s_Y^2 = \frac{\hat{\sigma}_Y^2 n}{n - 1}$ |

Дальнейшим этапом проверки гипотезы является применение F-критерия. В его основе лежит сравнение двух величин: $F_{чис}$, которая рассчитывается согласно формуле:

$$F_{чис} = \frac{s_\Phi^2}{s_0^2} \quad (33)$$

и $x_{пр,\alpha}^{кр}$, которая определяется исходя из количества степеней свободы $L = 2 - 1$ и $k = n - 2$ по соответствующей таблице значений для заданного уровня значимости α .

В случае если $F_{чис}$ оказывается больше $x_{пр,\alpha}^{кр}$, гипотеза H_0 отвергается – выборочный аналог генерального корреляционного отношения является значимым. Осуществляется переход к операции регрессионного анализа [98].

3.3.2.3. Проведение регрессионного анализа.

Функция, описывающая изменение группового среднего значений Y от значений X , называется функцией регрессии, вид которой может быть различным. Процедура определения функции регрессии – регрессионный анализ. В рамках алгоритма проводится определение линейной функции регрессии, как наиболее распространенной.

3.3.2.3.1. Получение линейной функции регрессии.

Для случая линейной зависимости Y и X выборочное уравнение регрессии принимает вид:

$$\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}x \quad (34)$$

Параметры \hat{a} и \hat{b} могут быть рассчитаны исходя из следующих уравнений:

$$\hat{a} = \bar{Y} - \hat{r}_{XY} \frac{\hat{\sigma}_Y}{\hat{\sigma}_X} \bar{X} \quad (35)$$

$$\hat{b} = \hat{r}_{XY} \frac{\hat{\sigma}_Y}{\hat{\sigma}_X} \quad (36)$$

3.3.2.3.2. Вычисление выборочного аналога коэффициента корреляции.

Параметр \hat{r}_{XY} называется выборочным аналогом коэффициента корреляции и рассчитывается согласно формуле:

$$\hat{r}_{XY} = \frac{\overline{XY} - \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\hat{\sigma}_X \hat{\sigma}_Y} \quad (37)$$

– где \bar{X} – общее среднее значений X , которое рассчитывается согласно формуле:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^v x_i n_i \quad (38)$$

– \bar{Y} – общее среднее значение Y , которое рассчитывается согласно формуле:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^q y_j m_j \quad (39)$$

– \overline{XY} – произведение соответствующих средних значений X и Y, которое рассчитывается согласно формуле:

$$\overline{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^q x_i y_j m_{ji} \quad (40)$$

– $\hat{\sigma}_X$ – выборочное среднее квадратичное отклонение значений X, которое рассчитывается согласно формуле:

$$\hat{\sigma}_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^v (x_i - \bar{X})^2 \cdot n_i} \quad (41)$$

– $\hat{\sigma}_Y$ – выборочное среднее квадратичное отклонение значений Y, которое рассчитывается согласно формуле:

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^q (y_j - \bar{Y})^2 \cdot m_j} \quad (42)$$

3.3.2.3.3. Проверка значимости выборочного аналога коэффициента корреляции. Дисперсионный анализ.

Значимость выборочного аналога коэффициента корреляции определяется аналогичному тому, как определялась значимость для выборочного генерального коэффициента корреляции. Осуществляется проверка гипотезы:

$$H_0: r_{XY} = 0 \quad (43)$$

Гипотеза проверяется при помощи дисперсионного анализа, основным тождеством при проведении которого является:

$$\hat{\sigma}_Y^2 = \hat{\sigma}_{\bar{Y}}^2 \text{лин} + \hat{\sigma}_0^2 \text{лин} \quad (44)$$

– где $\hat{\sigma}_Y^2$ – общая выборочная дисперсия значений Y;

– $\hat{\sigma}_{\hat{Y}}^2 \text{лин}$ – выборочная дисперсия значений Y , рассчитанных по линейному уравнению регрессии, которая связана с влиянием на нее фактора линейности функции регрессии. Рассчитывается согласно формуле:

$$\hat{\sigma}_{\hat{Y}}^2 \text{лин} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2 \quad (45)$$

– где \hat{Y}_i – значения Y , рассчитанные по выборочному уравнению регрессии;

– $\bar{\hat{Y}}$ – общее среднее значений Y , рассчитанных по выборочному уравнению регрессии, рассчитываемое согласно формуле:

$$\bar{\hat{Y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i \quad (46)$$

– $\hat{\sigma}_0^2 \text{лин}$ – выборочная дисперсия значений Y , рассчитанных по линейному уравнению регрессии, которая связана с влиянием на нее остаточных факторов. Рассчитывается согласно формуле:

$$\hat{\sigma}_0^2 \text{лин} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (47)$$

Таблица однофакторного дисперсионного анализа в данном случае принимает вид, представленный в таблице 18.

Таблица 18 – Таблица однофакторного дисперсионного анализа (регрессионный анализ)

| Источник вариации величины Y | Показатель вариации | Число степеней свободы | Несмещенная оценка дисперсии |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|
| Фактор – линейность функции регрессии | $\hat{\sigma}_{\hat{Y}}^2 \text{лин}$ | $v - 1$ | $s_{\phi}^2 = \frac{\hat{\sigma}_{\hat{Y}}^2 \text{лин} \cdot n}{v - n}$ |
| Остаточные факторы | $\hat{\sigma}_0^2 \text{лин}$ | $n - v$ | $s_0^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2 \text{лин} \cdot n}{n - v}$ |
| Общая вариация | $\hat{\sigma}_Y^2$ | $n - 1$ | $s_y^2 = \frac{\hat{\sigma}_Y^2 \cdot n}{n - 1}$ |

v в данном случае равняется 2, т.к. имеет смысл числа независимых параметров в линейной функции регрессии (a и b).

Дальнейшая проверка с помощью применения F-критерия позволяет определить справедливость гипотезы H_0 . $F_{\text{чис}}$ в данном случае вычисляется согласно формуле:

$$F_{\text{чис}} = \frac{S_{\phi}^2}{S_0^2} \quad (48)$$

Количество степеней свободы равняется $L = v - 1$ и $k = n - v$, соответственно.

В случае если $F_{\text{чис}}$ оказывается больше $x_{\text{пр},\alpha}^{\text{кр}}$, гипотеза H_0 отвергается – выборочный аналог коэффициента корреляции является значимым. Тогда выводится информация о линейной функции регрессии. Осуществляется переход к анализу следующей характеристики информационного потока [99].

3.4. Автономное тестирование элементов систем на базе SpaceWire.

По итогам разработки комплекса моделирования была выявлена потенциальная возможность расширения его функциональных характеристик в области проведения автономного тестирования элементов систем на базе SpaceWire, таких как оконечные узлы и маршрутизирующие коммутаторы. Такое тестирование позволяет на различных этапах создания элементов проводить ряд проверок на соответствие требованиям стандарта SpaceWire, а также стандартов транспортных протоколов, работающих совместно со SpaceWire [100].

С помощью средств блока автономного тестирования предоставляется возможность проведения ряда типовых тестов, а также оперативной разработки специфичных тестов в случае необходимости. Обозначенные средства применялись при тестировании СБИС контроллера информационно-управляющего интерфейса [101] на соответствие требованиям ряда пунктов стандарта SpaceWire и стандарта RMAP [102]. Тесты подразделяются на группы:

1) Для маршрутизирующих коммутаторов разработан ряд проверок, позволяющих установить их соответствие требованиям пункта 8.2

«Маршрутизирующие коммутаторы SpaceWire-RUS», обозначенного в стандарте ГОСТ Р 70020-2022. Среди данных проверок выделяются:

- поддержка механизма перенаправления пакета с входного порта, принявшего пакет, на выходной порт, определенный в соответствии с адресом назначения (пункт 8.2.3);

- поддержка механизма арбитража (пункт 8.2.5 стандарта);

- поддержка механизма групповой адаптивной маршрутизации (пункт 8.2.6);

- поддержка механизма группового вещания (пункт 8.2.7) [103].

Схема рабочего места и описание алгоритмов для проведения обозначенных проверок в виде блок-схем, сопровождающихся текстовым пояснением, представлены в приложении А.

2) Для конечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов разработан ряд проверок, позволяющих установить их соответствие требованиям пунктов 5.3. «Write Command», 5.4. «Read Command», 5.5. «Read-Modify-Write Command», обозначенных в стандарте ECSS-E-ST-50-52С. Среди данных проверок выделяются:

- корректность обработки трех типов команд (базовая проверка);

- корректность обработки команд, содержащих ошибки (расширенная проверка) [104] [105].

Схема рабочего места и описание алгоритмов для проведения обозначенных проверок в виде блок-схем, сопровождающихся текстовым пояснением, представлены в приложении Б.

3) Для конечных узлов разработан ряд проверок, позволяющих установить их корректную работу в соответствии с механизмом «Гарантированная доставка данных» СТП-ИСС. Среди данных проверок выделяются:

- корректность работы механизма гарантированной доставки (приемник);

– корректность работы механизма гарантированной доставки (передатчик) [106].

Схема рабочего места и описание алгоритмов для проведения обозначенных проверок в виде блок-схем, сопровождающихся текстовым пояснением, представлены в приложении В.

3.5. Выводы по третьей главе.

В данной главе описывается проведение исследований по проектированию и разработке комплекса моделирования, предназначенного для поддержки процесса создания систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА.

1) Описывается структура комплекса моделирования, являющегося основой для последующего проведения исследований по разработке алгоритмов его функционирования.

а) Выявлена целесообразность применения средств аппаратно-программного моделирования, что обуславливается текущим потенциальным применением разработки, который заключается в моделировании работы систем на базе SpaceWire, состоящих из малого количества (до 8) конечных узлов.

б) Проведен подбор специализированного оборудования, состоящего из образцов компаний 4Links – DSI, MSR и АО «РЕШЕТНЁВ» – Маршрутизирующий коммутатор на базе СБИС 1931КХ014.

в) Представлена итоговая структура комплекса моделирования, состоящая из ряда функциональных блоков, каждый из которых предназначен для решения определенных задач. Дополнительно представлена возможность расширения функциональных характеристик разработки в области автономного тестирования элементов систем на базе SpaceWire.

2) Описывается логика функционирования комплекса моделирования, определяемая исходя из разработанных для него алгоритмов, относящихся как к непосредственному процессу функционирования модели системы на

базе SpaceWire, так и к следующему за ним процессу анализа информационного взаимодействия.

а) В разделе, посвященном функционированию модели системы на базе SpaceWire, представлен как алгоритм работы всей системы, как единого комплекса, так и алгоритмы работы ее отдельных элементов – конечных узлов (информационных потоков), с помощью которых обеспечивается решение задачи по обработке информации о функционировании объекта моделирования. Ключевыми алгоритмами являются:

– алгоритм, позволяющий учитывать взаимосвязи информационных потоков, посредством передачи данных из состава этих информационных потоков в определенной последовательности и с установкой временных задержек между ними;

– алгоритм, обеспечивающий передачу данных по запросу с помощью представления процесса возникновения запросов как простейшего или стационарного пуассоновского процесса;

– алгоритм расчета положений искажений в передаваемых данных, в основе которого лежит имитация воздействий заряженных частиц космического пространства.

б) В разделе, посвященном анализу информационного взаимодействия, представлена основная выделяемая информация об отдельных пакетах, передаваемых в ходе моделирования, на основании которой в соответствии с приведенными формулами осуществляется расчет характеристик информационных потоков.

3) Описывается методика исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов, предназначенная для проведения прикладных статистических исследований, направленных на анализ функционирования данных систем в условиях изменения параметров информационного взаимодействия. В соответствии с методикой проводится несколько итераций моделирования и последующего анализа информационного взаимодействия с различными условиями,

закрывающимися в изменении уровня того или иного фактора, в качестве которого задается один из параметров конфигурации комплекса моделирования. По завершении всех итераций применяются методы математической статистики – корреляционный и регрессионный анализ. С помощью данных методов достигается возможность построения линейной регрессионной модели.

4) Дополнительно представлены алгоритмы, позволяющие проводить автономное тестирование элементов систем на базе SpaceWire на соответствие требованиям стандарта SpaceWire, а также стандартов и спецификаций транспортных протоколов, работающих совместно со SpaceWire.

4. Проведение экспериментов и анализ результатов.

Описание экспериментальной отработки и анализа результатов подразделяется на две части для демонстрации всех возможностей разработки. В первой части рассматриваются результаты работы отдельных алгоритмов, выделяемых в качестве ключевых для настоящего диссертационного исследования. Вторая часть содержит описание результатов работы комплекса моделирования при выполнении поставленных перед ней задач по определению характеристик информационных потоков и исследованию зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

4.1. Инфраструктура системы в экспериментах.

Инфраструктура системы для всех экспериментов соответствует сходной инфраструктуре из состава одного из отечественных КА, которая была представлена во второй главе. Присутствует несколько упрощений:

- четыре маршрутизирующих коммутатора заменены одним маршрутизирующим коммутатором;
- отсутствуют резервные комплекты оконечных узлов;
- отсутствуют резервные порты оконечных узлов.

Следует отметить, что допустимость данных упрощений обусловлена тем, что задача по отработке отказов и сбоев различных элементов системы не ставилась. Структурная схема упрощенной системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА представлена на рисунке 39.

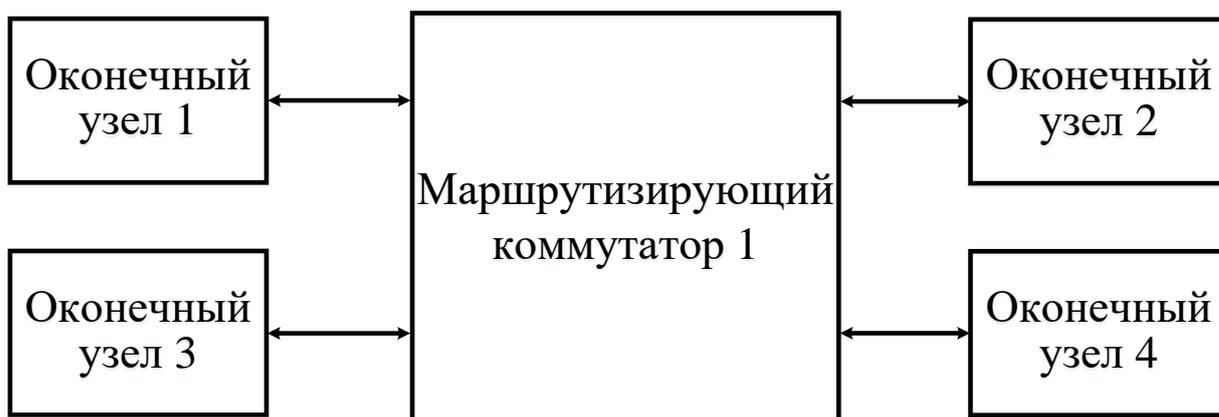


Рисунок 39 – Структурная схема упрощенной системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА

Структурная схема модели упрощенной системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА представлена на рисунке 40.

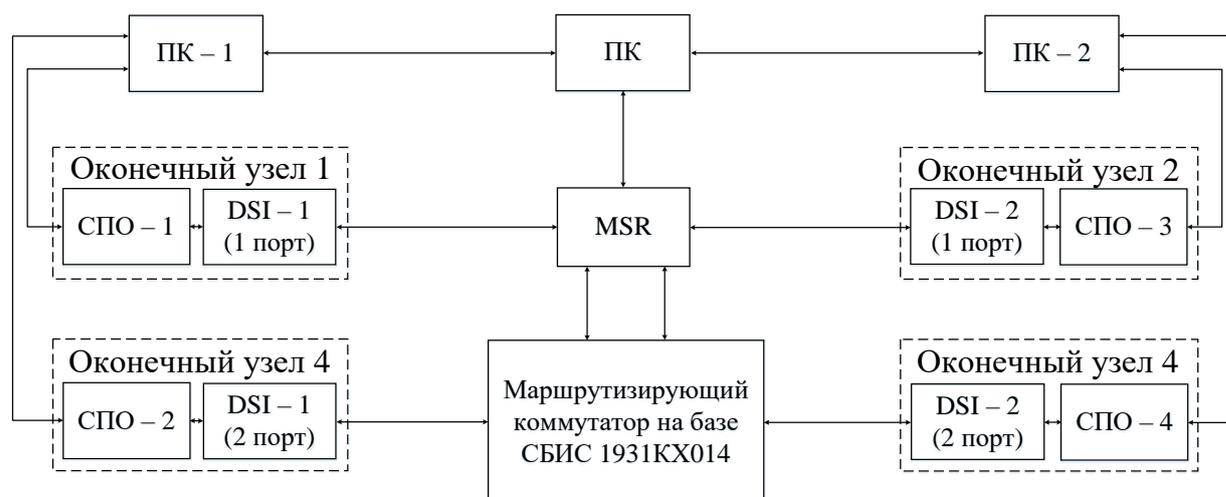


Рисунок 40 – Структурная схема модели упрощенной системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА

Физическая сборка модели упрощенной системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА представлена на рисунке 41.

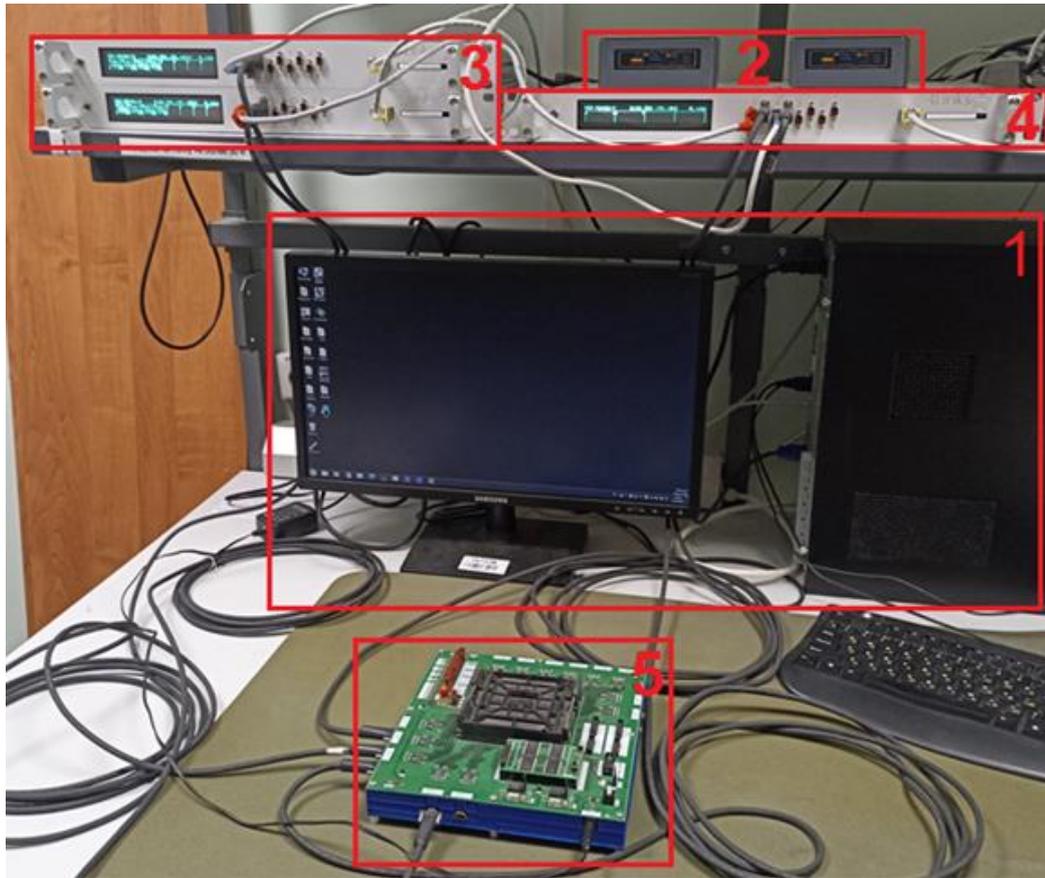


Рисунок 41 – Физическая сборка модели упрощенной системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА:
1 – блок управления; 2 – вычислительные устройства; 3 – интерфейсные мосты; 4 – анализатор; 5 – маршрутизирующий коммутатор

Для определения характеристик информационных потоков во второй части главы выделен канал передачи данных между оконечными узлами 1 и 2. В зависимости от необходимости могут анализироваться другие каналы передачи данных.

4.2. Результаты работы отдельных алгоритмов.

Для того чтобы продемонстрировать преимущества применения разработанных алгоритмов ставится ряд задач по моделированию работы системы на базе SpaceWire, которые решаются с помощью применения комплекса моделирования и с помощью средств одного из рассматриваемых во второй главе технических решений – SANDS (далее – аналог). Выбор данного технического решения для сопоставления обусловлен двумя

факторами: широким спектром возможностей моделирования и доступностью для применения.

4.2.1. Алгоритм передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков.

Для демонстрации работы алгоритма рассматривается передача данных из состава информационных потоков 1, 2, 3, функционирующих в шестом режиме информационного взаимодействия между оконечными узлами 1 и 2 (таблица 7). Для информационных потоков определена передача данных по запросу, в то время как при моделировании задается передача данных с периодом 500 мс (фокусировка внимания на функционировании конкретного алгоритма).

В соответствии с информацией, представленной во второй главе, передача данных из состава информационного потока 3 происходит последовательно и без задержек за передачей данных из состава информационного потока 2 (вне зависимости от наличия ошибок), после чего спустя 20 мс происходит передача данных из состава информационного потока 1 (только при отсутствии ошибок). В случае если в ходе передачи данных из состава какого-либо из обозначенных информационных потоков происходит ошибка, то весь процесс описанного информационного взаимодействия повторяется спустя 40 мс (максимальное количество передач равняется четырем).

Рассматривается ситуация, когда в ходе передачи данных из состава информационного потока 1 внедряется искажение. На рисунке 42 представлена временная диаграмма, на которой обозначены моменты времени передачи данных с использованием комплекса моделирования и аналога.

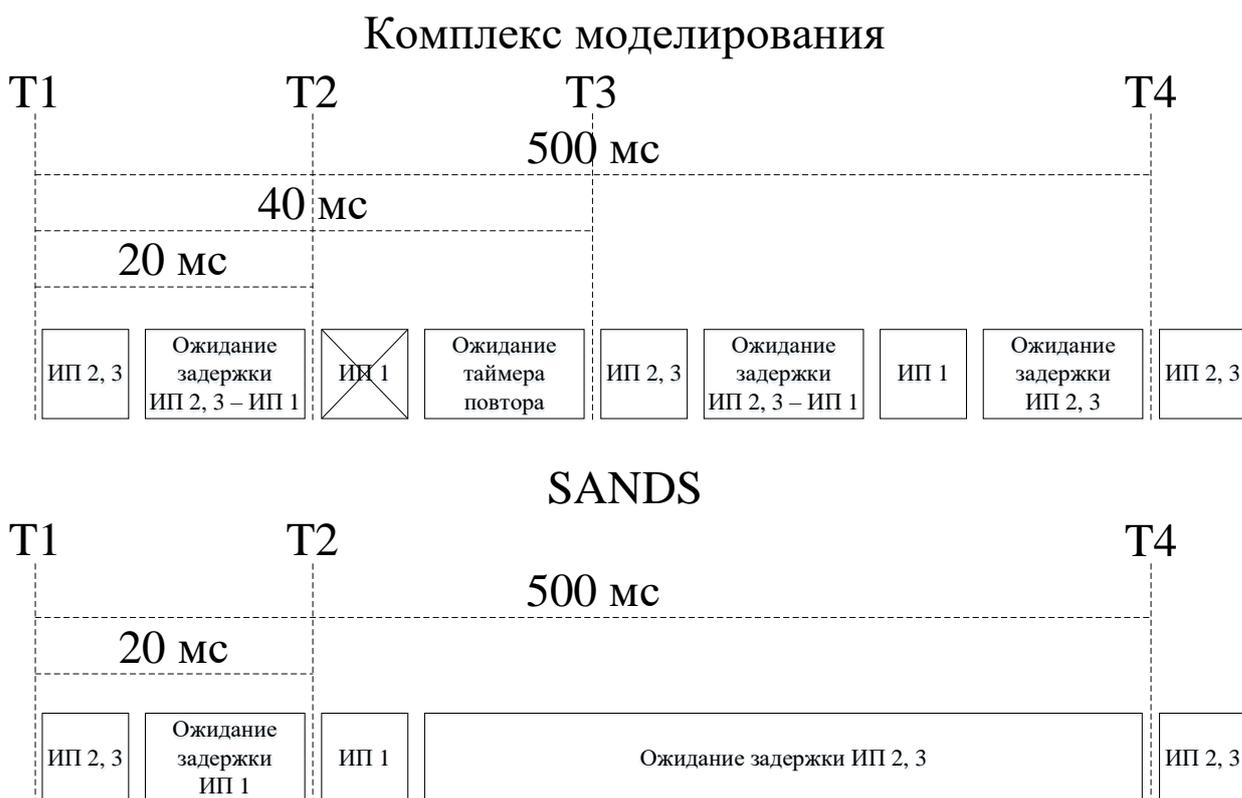


Рисунок 42 – Временная диаграмма моделирования передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков с помощью комплекса моделирования и аналога

Диаграмма иллюстрирует, что благодаря предложенному алгоритму комплекс моделирования обеспечивает корректную обработку информации о функционировании объекта моделирования в отношении взаимосвязи информационных потоков. Следствием является влияние на итоговые характеристики информационных потоков, в частности – на задержки передачи данных. В момент повторной передачи данных из состава информационных потоков 2, 3 система получает дополнительную нагрузку, из-за чего для передаваемых данных из состава других информационных потоков может увеличиться задержка. В худшем случае увеличение данной характеристики определяется суммарной задержкой передачи данных из состава информационных потоков 2, 3. При установленной скорости передачи данных равной 10 Мбит/с, дополнительная задержка составит $\approx 1,53$ мс. Если объем передаваемых данных из состава блокируемого

информационного потока составляет, например, 500 байт, то итоговая задержка передачи данных увеличится в ~ 4 раза. Вклад дополнительной задержки может стать критическим для обеспечения требуемого уровня общей задержки передачи данных из состава блокируемого информационного потока. В данном случае разработчиком системы могут быть предприняты меры по устранению данной проблемы путем внесения уточнений в работу модели системы. В случае применения аналога, данная проблема не выявляется.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет обеспечивать адекватность функционирования модели в отношении передачи данных из состава информационных потоков, обладающих взаимосвязью, что в свою очередь ведет к повышению точности результатов моделирования.

4.2.2. Алгоритм передачи данных по запросу.

Для демонстрации работы алгоритма рассматривается передача данных из состава информационного потока 4, представленного в таблице 7. На основании экспертной оценки для обозначенного информационного потока задается интенсивность передачи данных равная одному пакету (математическое ожидание λ) в пятьсот мс (единица времени $T_{ед}$). На рисунке 43 представлена временная шкала, на которой обозначены моменты времени передачи данных с использованием средств комплекса моделирования и аналога.

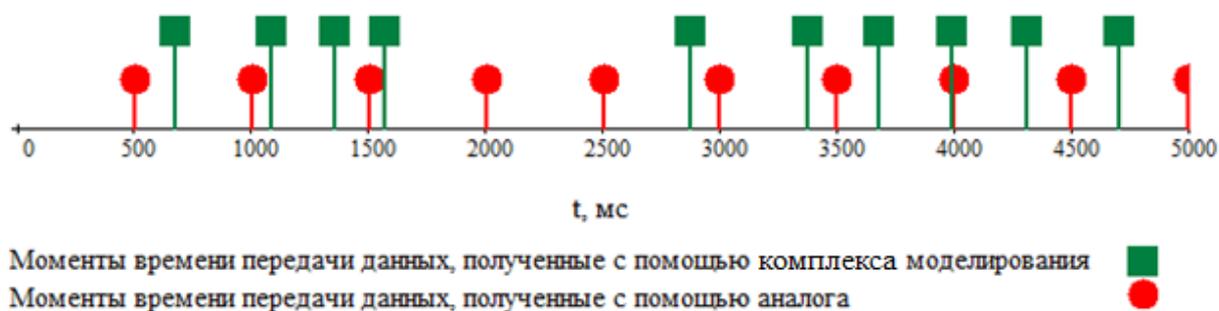


Рисунок 43 – Временная шкала, определяющая моменты времени передачи данных с использованием средств комплекса моделирования и аналога

Из графика следует, что с помощью комплекса моделирования достигается возможность имитации передачи данных по запросу в виде простейшего пуассоновского процесса с заданными параметрами ($T_{ед}$ и λ), в то время как для аналога единственно возможной является передача данных с постоянным периодом.

4.2.3. Алгоритм оценки искажений передаваемых данных.

Для демонстрации работы алгоритма рассматривается передача данных из состава информационного потока 1, приведенного в таблице 7. В качестве заряженных частиц, вызывающих искажения определяются ТЗЧ СКЛ и протоны СКЛ. Для каждого типа заряженной частицы определяются параметры конфигурации: число искажений за секунду, которым подвергается бит данных, находящийся в распоряжении элемента, стоящего на маршруте следования данных (V) и время, в течение которого бит данных находится в распоряжении этого элемента (T). В таблицах 19, 20 представлены данные значения для обозначенных типов заряженных частиц.

Таблица 19 – Параметры конфигурации для ТЗЧ СКЛ

| Элемент, стоящий на маршруте следования данных | V | T, c |
|--|---------------------|-------------------|
| Оконечный узел (передатчик) | $6,9 \cdot 10^{-5}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ |
| Кабель 1 | $6,9 \cdot 10^{-7}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ |
| Маршрутизирующий коммутатор | $6,9 \cdot 10^{-6}$ | 10^{-6} |
| Кабель 2 | $6,9 \cdot 10^{-7}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ |
| Оконечный узел (приемник) | $6,9 \cdot 10^{-5}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ |

Таблица 20 – Параметры конфигурации для протонов СКЛ

| Элемент, стоящий на маршруте следования данных | V | T, c |
|--|---------------------|-------------------|
| Оконечный узел (передатчик) | $6,8 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ |
| Кабель 1 | $6,8 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ |
| Маршрутизирующий коммутатор | $6,8 \cdot 10^{-5}$ | 10^{-6} |
| Кабель 2 | $6,8 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ |
| Оконечный узел (приемник) | $6,8 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ |

В соответствии с данными конфигурациями параметр μ выходит равным $1,66 \cdot 10^7$ (соответствует частоте внедряемых искажений: $6 \cdot 10^{-8}$).

Параметр σ задается равным $\mu / 10$.

Аналог позволяет вносить искажения в передаваемые данные с помощью задания параметра коэффициента битовых ошибок (BER) для кабелей (по смыслу соответствует частоте внедряемых искажений). Предлагается осуществлять задание данного параметра для двух кабелей как приблизительную суммарную частоту возникновения искажений, обусловленных влиянием всех типов заряженных частиц, для всех элементов, находящихся на маршруте следования данных. Конфигурация коэффициента доступна в виде 10^{-N} , где для настройки доступно только значение N. Моделируется работа системы с заданием BER равным 10^{-7} (для одного кабеля) и 10^{-8} (для двух кабелей). Итоговые значения частоты внедряемых искажений в равной степени отстоят от полученного для комплекса моделирования значения: $6 \cdot 10^{-8}$.

На рисунке 44 представлена шкала, иллюстрирующая номера искаженных пакетов из состава информационного потока, полученные с помощью комплекса моделирования и аналога (с двумя конфигурациями).

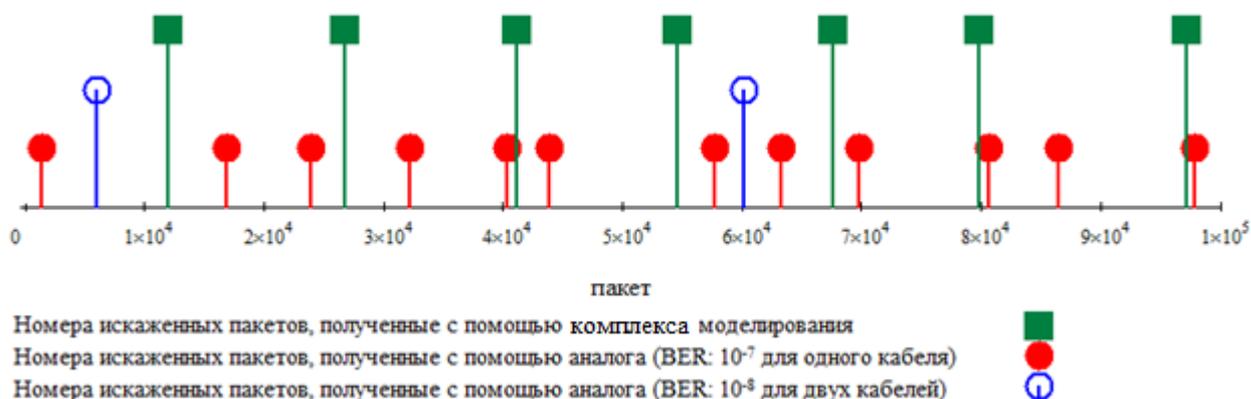


Рисунок 44 – Шкала, иллюстрирующая номера искаженных пакетов, полученные с помощью комплекса моделирования и аналога

Из рисунка следует как несоответствие номеров искажаемых пакетов, полученных с помощью комплекса моделирования и аналога, так и их количество: 6 для комплекса моделирования и 12, 2 для аналога (разные

конфигурации). Данные показатели отражаются на итоговых значениях такой характеристики информационного потока как вероятность доставки данных без искажений, которая будет получена в процессе анализа информационного взаимодействия. Значения данной характеристики в свою очередь могут являться основанием для применения или корректировки параметров механизмов, связанных с обеспечением надежной доставки данных. Подводя итог, предложенный алгоритм обладает следующими преимуществами по сравнению с аналогом:

1) Предоставляется возможность детализированного задания конфигурационных параметров модели для их последующей обработки с целью обеспечения учета влияния факторов, вызывающих искажения передаваемых данных в условиях космического пространства, т.е. обеспечивается имитация условий функционирования объекта моделирования.

2) Точность задания значения частоты искажений бит выше, поскольку для аналога доступно задание данного параметра в виде 10^{-N} . В представленном примере иллюстрируется наихудший случай для такой грубой оценки: ближайшие задаваемые с помощью аналога значения ($1 \cdot 10^{-7}$ и $2 \cdot 10^{-8}$) отличаются от фактического значения частоты ($6 \cdot 10^{-8}$) с относительной погрешностью 66,67%.

3) Номера искажаемых бит могут быть заданы с постоянным периодом ($\sigma = 0$), что может быть полезно, если требуется проведение исследования, в котором искажения внедряются в определенные позиции передаваемых данных.

4.3. Результаты работы комплекса моделирования.

4.3.1. Конфигурационные параметры комплекса моделирования.

Для демонстрации работы комплекса моделирования конфигурационные параметры задаются таким образом, чтобы обеспечить, насколько это возможно, соответствие функционирования модели и объекта моделирования:

1) Конфигурации информационных потоков задаются в соответствии с таблицей 7. Исключение составляют конфигурации условия передачи данных (задаются некоторые абстрактные значения периода передачи данных). Кроме того, не учитываются взаимосвязи информационных потоков. Данное решение обусловлено тем, что результаты сопоставляются с результатами, полученными с помощью аналога. В разделе «Результаты работы отдельных алгоритмов» данной главы показано, что для данного технического решения отсутствует возможность воспроизведения особенностей информационного взаимодействия систем на базе SpaceWire отечественных КА.

2) Конфигурации маршрутизирующих коммутаторов (таблица маршрутизации) представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Конфигурации маршрутизирующих коммутаторов

| Параметр | Оконечный узел 1 | Оконечный узел 2 | Оконечный узел 3 | Оконечный узел 4 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Логический адрес | 40 | 56 | 57 | 58 |
| Порт | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Удаление заголовка | – | – | – | – |
| Арбитраж | – | – | – | – |
| Мультивещание | – | – | – | – |
| ГАМ | – | – | – | – |

3) Скорость передачи данных задается равной 10 Мбит/с.

4) Внедрение искажений в передаваемые данные задается с помощью грубой оценки параметров:

$$- \mu = 10^7;$$

$$- \sigma = \mu / 10.$$

Для аналога внедрение искажений осуществляется с помощью задания параметра коэффициента битовых ошибок аналогично тому, как это происходило в разделе «Результаты работы отдельных алгоритмов» данной главы. Параметры подбираются с максимальным приближением итоговой частоте внедрения искажений в передаваемые данные, полученной для комплекса моделирования.

4.3.2. Определение значений характеристик информационных потоков.

В процессе проведения моделирования и последующего анализа информационного взаимодействия с помощью комплекса моделирования определяются значения характеристик информационных потоков. Данные значения сопоставляются со значениями, полученными с помощью аналога. Сопоставление необходимо для того, чтобы удостовериться в успешном достижении задач, ставящихся перед разработанным техническим решением, т.е. подтвердить его адекватность.

Дополнительно результаты, относящиеся к временным параметрам, сопоставляются с результатами, полученными с помощью аналитических моделей. Существует множество аналитических моделей для расчета задержек передачи данных в системах на базе SpaceWire. Общими для данных моделей являются составляющие задержек, среди которых выделяются:

- задержка передачи данных по кабелям;
- задержка обработки заголовка данных маршрутизирующими коммутаторами.

Предлагается воспользоваться следующей формулой для расчета минимальной задержки передачи данных:

$$T_{\min} = \frac{n \cdot 10 + 4}{F} + \sum_{i=1}^S th_i \quad (49)$$

- где n – количество байт передаваемых данных;
- F – установленная скорость передачи данных на маршруте их следования;
- S – количество маршрутизирующих коммутаторов на пути следования данных;
- th_i – время обработки заголовка передаваемых данных i -ым маршрутизирующим коммутатором [107].

Аналогично аналитическим моделям для расчета задержек передачи данных составляются аналитические модели для расчета времени выполнения команды (при передаче команд транспортного протокола RMAP).

Итак, в процессе определения характеристик информационных потоков с помощью средств комплекса моделирования (KM), SANDS (S) и аналитических моделей (AM) объем выборки для проведения анализа информационного взаимодействия задается равным 10^6 пакетов из состава информационных потоков (для каждого). Результаты анализа представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Результаты анализа информационного взаимодействия (информационные потоки (ИП) между оконечными узлами 1 и 2)

| ИП, средство получения характеристик | | Задержка передачи данных, мкс | Скорость передачи данных, Мбит/с | Вероятность доставки данных без искажений | Время выполнения команды, мкс | Вероятность выполнения команды без искажений |
|--------------------------------------|----|-------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------|--|
| ИП 1 | KM | 118,34 | 6,78 | $1 - 116 \cdot 10^{-6}$ | 127,97 | $1 - 127 \cdot 10^{-6}$ |
| | S | 118,78 | 6,74 | $1 - 117 \cdot 10^{-6}$ | 128,56 | $1 - 125 \cdot 10^{-6}$ |
| | AM | 117,62 | 6,80 | – | 126,24 | – |
| ИП 2* | KM | 514,39 | 7,78 | $1 - 516 \cdot 10^{-6}$ | 531,55 | $1 - 529 \cdot 10^{-6}$ |
| | S | 514,78 | 7,77 | $1 - 515 \cdot 10^{-6}$ | 532,24 | $1 - 529 \cdot 10^{-6}$ |
| | AM | 513,62 | 7,79 | – | 530,24 | – |
| ИП 3* | KM | 1014,31 | 7,89 | $1 - 101 \cdot 10^{-5}$ | 1031,69 | $1 - 103 \cdot 10^{-5}$ |
| | S | 1014,78 | 7,88 | $1 - 101 \cdot 10^{-5}$ | 1032,56 | $1 - 103 \cdot 10^{-5}$ |
| | AM | 1013,62 | 7,89 | – | 1030,24 | – |
| ИП 4* | KM | 314,28 | 7,64 | $1 - 315 \cdot 10^{-6}$ | 332,02 | $1 - 327 \cdot 10^{-6}$ |
| | S | 314,78 | 7,62 | $1 - 315 \cdot 10^{-6}$ | 332,56 | $1 - 326 \cdot 10^{-6}$ |
| | AM | 313,62 | 7,65 | – | 330,24 | – |

* Для информационных потоков с типом команды чтения задержка и скорость передачи данных, вероятность доставки данных без искажений определяются для ответа, т.к. для команд чтения именно ответ содержит фактически передаваемые данные.

Прилагаются результаты расчета относительной погрешности комплекса моделирования (по отношению к аналогу и аналитическим

моделям) для каждой характеристики информационных потоков, в соответствии с формулой:

$$\delta = \frac{X - X_D}{X_D} \cdot 100\% \quad (50)$$

– где X – значение, полученное с помощью средств комплекса моделирования;

– X_D – значение, полученное с помощью средств аналога / аналитических моделей.

Результаты представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Результаты расчета относительной погрешности (информационные потоки (ИП) между окончательными узлами 1 и 2)

| ИП, средство получения характеристик | | Задержка передачи данных | Скорость передачи данных | Вероятность доставки данных без искажений | Время выполнения команды | Вероятность выполнения команды без искажений |
|--------------------------------------|----|--------------------------|--------------------------|---|--------------------------|--|
| ИП 1 | S | 0,37% | 0,59% | 0% | 0,46% | 0% |
| | AM | 0,61% | 0,29% | – | 1,37% | – |
| ИП 2 | S | 0,08% | 0,13% | 0% | 0,13% | 0% |
| | AM | 0,15% | 0,13% | – | 0,24% | – |
| ИП 3 | S | 0,05% | 0,13% | 0% | 0,08% | 0% |
| | AM | 0,07% | 0% | – | 0,14% | – |
| ИП 4 | S | 0,16% | 0,26% | 0% | 0,16% | 0% |
| | AM | 0,21% | 0,13% | – | 0,54% | – |

Из таблицы следует близость результатов, полученных с помощью двух технических решений и аналитических моделей. Для большинства значений характеристик информационных потоков, полученных с помощью комплекса моделирования, относительные погрешности составили менее 1%. Таким образом, подтверждена адекватность разработки.

4.3.3. Исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

Для демонстрации работы комплекса моделирования при решении задачи исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов в качестве фактора выбирается объем передаваемых данных. Дискретный ряд значений фактора задается исходя из следующего

правила: объем данных (без учета заголовка транспортного протокола) из состава каждого информационного потока умножается на коэффициент из диапазона [1, 10] с шагом 1. Коэффициент соответствует итерации моделирования. Например, для информационного потока 1 дискретный ряд значений определяется следующим образом: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 байт.

В ходе проведения моделирования и последующего анализа информационного взаимодействия (объем выборки задается равным 10^6 пакетов из состава информационных потоков) были выявлены зависимости характеристик информационных потоков (из числа представленных в таблице 7) от объема передаваемых данных, что отражено в таблицах 24, 25, 26, 27, соответственно.

Таблица 24 – Исследование зависимости характеристик информационного потока 1 от объема передаваемых данных (x в бит)

| Характеристика | $\hat{\rho}_{Y/X}$ | \hat{r}_{XY} | \hat{Y} |
|--|--------------------|----------------|---|
| Задержка передачи данных, мкс | 0,999 | 0,999 | $17,709 + 0,100 x$ |
| Скорость передачи данных, Мбит/с | 0,864 | 0,829 | $7,091 + 8,939 \cdot 10^{-5} x$ |
| Вероятность доставки данных без искажений | 0,012 | -0,012 | $1 - 1,7 \cdot 10^{-5} - x \cdot 10^{-7}$ |
| Время выполнения команды, мкс | 0,999 | 0,999 | $26,375 + 0,100 x$ |
| Вероятность выполнения команды без искажений | 0,012 | -0,012 | $1 - 2,6 \cdot 10^{-5} - 10^{-7} x$ |

Таблица 25 – Исследование зависимости характеристик информационного потока 2 от объема передаваемых данных (x в бит)

| Характеристика | $\hat{\rho}_{Y/X}$ | \hat{r}_{XY} | \hat{Y} |
|--|--------------------|----------------|---|
| Задержка передачи данных, мкс | 0,999 | 0,999 | $17,255 + 0,100 x$ |
| Скорость передачи данных, Мбит/с | 0,840 | 0,813 | $7,769 + 4,025 \cdot 10^{-6} x$ |
| Вероятность доставки данных без искажений | 0,028 | -0,028 | $1 - 1,7 \cdot 10^{-5} - x \cdot 10^{-7}$ |
| Время выполнения команды, мкс | 0,999 | 0,999 | $30,127 + 0,100 x$ |
| Вероятность выполнения команды без искажений | 0,028 | -0,028 | $1 - 2,7 \cdot 10^{-5} - 10^{-7} x$ |

Таблица 26 – Исследование зависимости характеристик информационного потока 3 от объема передаваемых данных (x в бит)

| Характеристика | $\hat{\rho}_{Y/X}$ | \hat{r}_{XY} | \hat{Y} |
|--|--------------------|----------------|---|
| Задержка передачи данных, мкс | 0,999 | 0,999 | $16,701 + 0,100 x$ |
| Скорость передачи данных, Мбит/с | 0,836 | 0,811 | $7,869 + 9,654 \cdot 10^{-7} x$ |
| Вероятность доставки данных без искажений | 0,039 | -0,039 | $1 - 1,6 \cdot 10^{-5} - x \cdot 10^{-7}$ |
| Время выполнения команды, мкс | 0,999 | 0,999 | $30,386 + 0,100 x$ |
| Вероятность выполнения команды без искажений | 0,040 | -0,039 | $1 - 2,8 \cdot 10^{-5} - x \cdot 10^{-7}$ |

Таблица 27 – Исследование зависимости характеристик информационного потока 4 от объема передаваемых данных (x в бит)

| Характеристика | $\hat{\rho}_{Y/X}$ | \hat{r}_{XY} | \hat{Y} |
|--|--------------------|----------------|---|
| Задержка передачи данных, мкс | 0,999 | 0,999 | $17,562 + 0,100 x$ |
| Скорость передачи данных, Мбит/с | 0,851 | 0,820 | $7,533 + 5,802 \cdot 10^{-6} x$ |
| Вероятность доставки данных без искажений | 0,019 | -0,019 | $1 - 1,7 \cdot 10^{-5} - x \cdot 10^{-7}$ |
| Время выполнения команды, мкс | 0,999 | 0,999 | $30,028 + 0,100 x$ |
| Вероятность выполнения команды без искажений | 0,019 | -0,019 | $1 - 2,7 \cdot 10^{-5} - x \cdot 10^{-7}$ |

В качестве иллюстрирующего примера на рисунках 45, 46, 47, 48, 49 представлены графики линейной функции регрессии характеристики задержки передачи данных, скорости передачи данных, вероятности доставки данных без искажений, времени выполнения команды и вероятности выполнения команды без искажений, соответственно, от объема передаваемых данных из состава информационного потока 1.

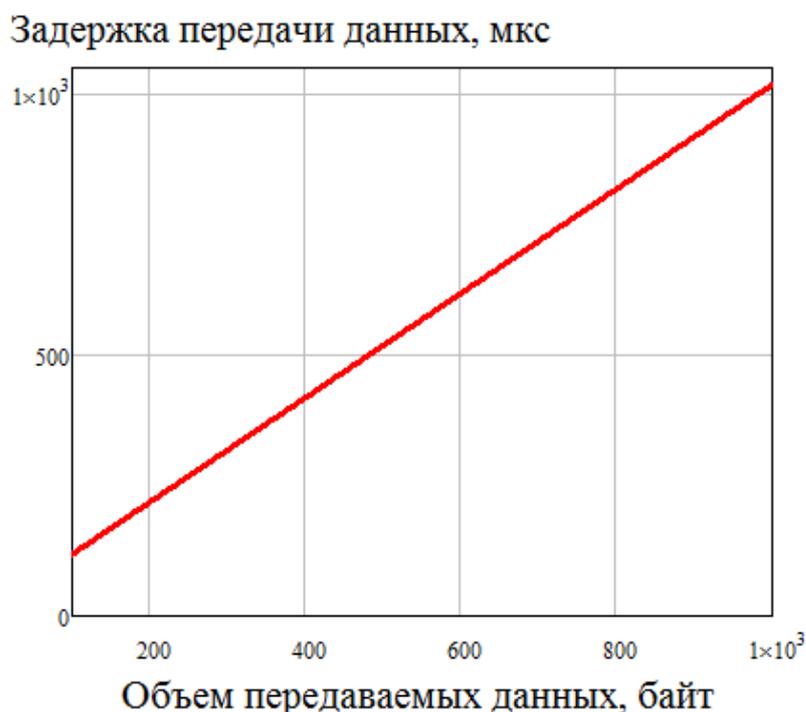


Рисунок 45 – График линейной функции регрессии характеристики задержки передачи данных от объема передаваемых данных из состава информационного потока 1

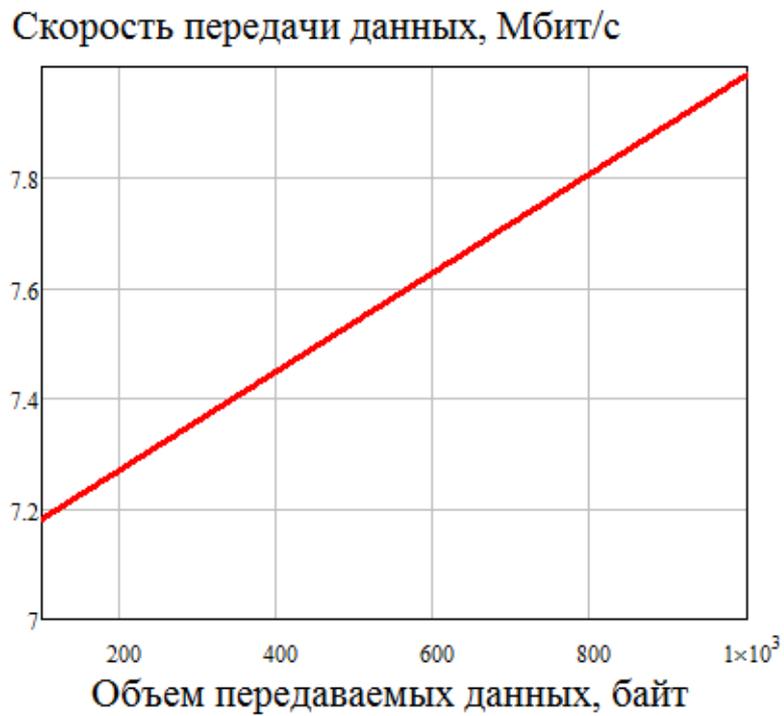


Рисунок 46 – График линейной функции регрессии характеристики скорости передачи данных от объема передаваемых данных из состава информационного потока 1

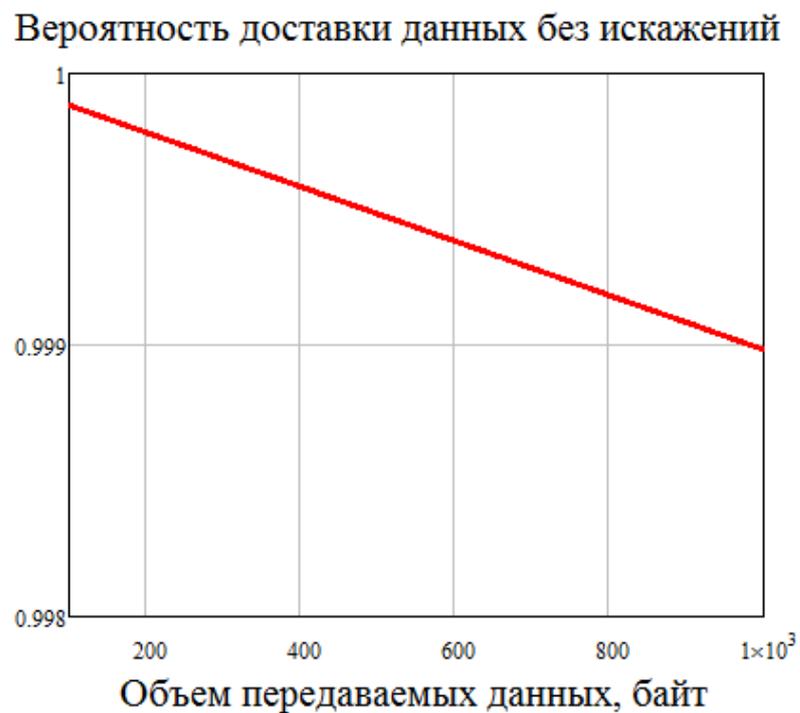


Рисунок 47 – График линейной функции регрессии характеристики вероятности доставки данных без искажений от объема передаваемых данных из состава информационного потока 1

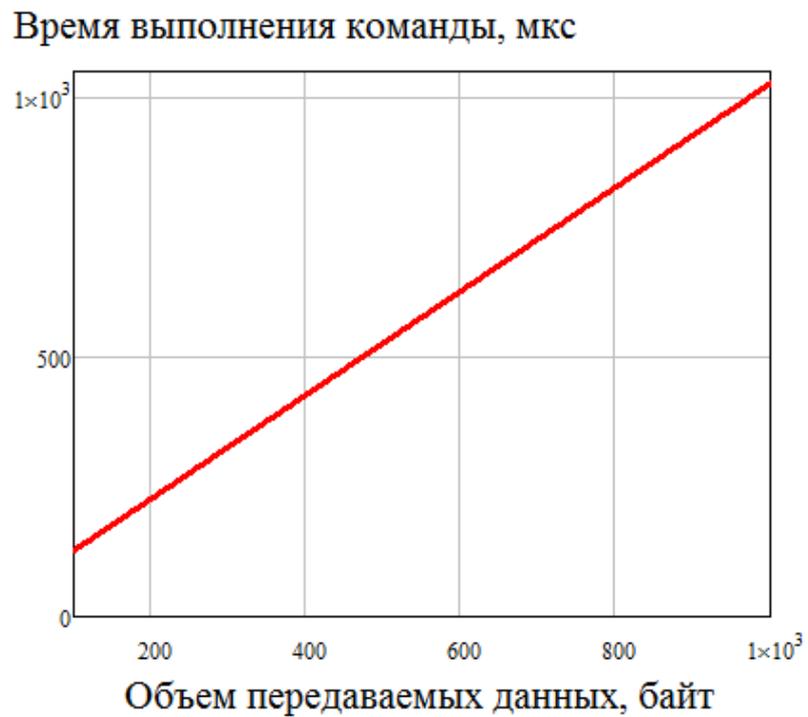


Рисунок 48 – График линейной функции регрессии характеристики времени выполнения команды от объема передаваемых данных из состава информационного потока 1

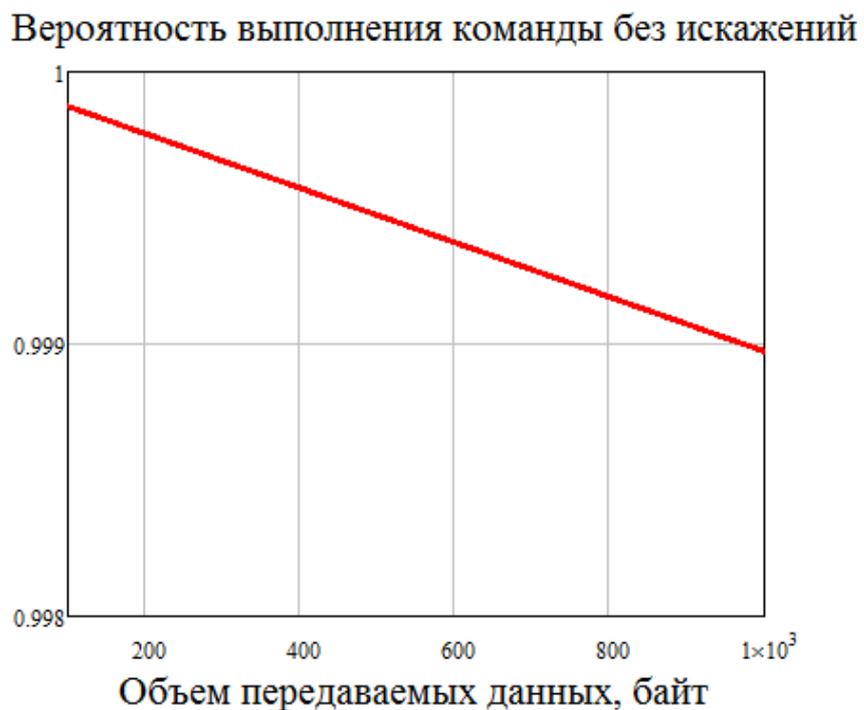


Рисунок 49 – График линейной функции регрессии характеристики вероятности выполнения команды без искажений от объема передаваемых данных из состава информационного потока 1

Из графиков, представленных на рисунках 45, 46, 47, 48, 49 следует, что объем передаваемых данных обладает как положительной, так и отрицательной линейной зависимостью с различными характеристиками информационных потоков.

По результатам решения комплекс моделирования задачи по исследованию зависимости характеристик информационных потоков от объема передаваемых данных отмечается, что с его помощью могут обеспечиваться:

- косвенное определение значений характеристик информационных потоков (для промежуточных значений уровней фактора);
- прогнозирование значений характеристик информационных потоков (для значений фактора выше предельного уровня).

Полученная информация может рассматриваться в качестве основы для принятия решений по дальнейшему управлению развитием информационного взаимодействия в рассматриваемой системе на базе SpaceWire.

4.4. Выводы по четвертой главе.

В данной главе описывается экспериментальная отработка комплекса моделирования. Глава подразделяется на два основных раздела:

1) В разделе, посвященном результатам работы отдельных алгоритмов, ставится ряд частных задач по моделированию работы системы на базе SpaceWire. Данные задачи решаются с помощью применения двух технических решений – комплекса моделирования и SANDS:

а) В ходе рассмотрения работы алгоритма передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков выявлено, что в отличие от аналога комплекс моделирования позволяет корректно обрабатывать ситуации, когда в процессе передачи данных из состава какого-либо информационного потока, обладающего взаимосвязью с другими информационными потоками, происходит ошибка (осуществление повторной передачи данных из состава всех взаимосвязанных информационных

потоков), что в свою очередь сказывается на точности результатов моделирования.

б) В ходе рассмотрения работы алгоритма передачи данных по запросу выявлено, что в отличие от аналога комплекс моделирования позволяет осуществлять передачу данных не только с постоянным периодом, но и в случайные моменты времени (стационарный пуассоновский процесс), что может рассматриваться в качестве приближенной модели передачи данных по запросу.

в) В ходе рассмотрения работы алгоритма расчета положений искажений в передаваемых данных выявлено, что по сравнению с аналогом, комплекс моделирования обеспечивает более детализированное и точное задание конфигурационных параметров модели. Для каждого типа заряженной частицы задается число искажений за секунду, которым подвергается бит данных, находящийся в распоряжении каждого элемента, стоящего на маршруте следования данных и время, в течение которого бит данных находится в распоряжении этого элемента. Последующая обработка обозначенных параметров с помощью предложенного алгоритма обеспечивает имитацию условий функционирования объекта моделирования.

2) В разделе, посвященном результатам работы комплекса моделирования, рассматривается:

а) Определение характеристик информационных потоков. Осуществляется моделирование работы упрощенной системы на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА с последующим анализом информационного взаимодействия. Полученные результаты (значения характеристик информационных потоков) сопоставляются с результатами, полученными с помощью аналога и аналитических моделей, благодаря чему подтверждается адекватность разработанного комплекса моделирования.

б) Исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов. В качестве фактора определен объем передаваемых данных. Проводятся исследования, по результатам которых выводятся

выборочный аналог генерального корреляционного отношения, выборочный аналог коэффициента корреляции и линейная функция регрессии для ряда характеристик информационных потоков. Проведенные исследования являются подтверждением того, что комплекс моделирования предоставляет статистическое обеспечение анализа развития информационного взаимодействия в системах на базе SpaceWire.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационного исследования разработано техническое решение – комплекс моделирования работы распределенных бортовых систем на базе SpaceWire перспективных автоматических КА. Решались следующие задачи:

1) В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire в отечественной космической отрасли определена необходимость наличия комплекса моделирования, обеспечивающей поддержку процесса создания систем, построенных на основе данной технологии. Рассмотрена информация о типовом объекте моделирования – системе на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА. Сформулированы требования к комплексу моделирования работы систем на базе SpaceWire:

- определены задачи, ставящиеся перед комплексом моделирования;
- определены конфигурационные параметры комплекса моделирования на основании информации, полученной в процессе декомпозиции объекта моделирования.

2) Анализ существующих технических решений, обеспечивающих моделирование работы систем на базе SpaceWire, выявил недостаточность функциональных характеристик данных разработок для применения в процессе создания систем на базе SpaceWire перспективных автоматических КА. На данном основании поставлена задача по проведению исследований, направленных на проектирование и разработку комплекса моделирования, отвечающего всем поставленным требованиям.

3) Процесс исследований по разработке комплекса моделирования состоял из трех частей:

а) В первой части представлено исследование, связанное с проектированием структуры комплекса моделирования, состоящей из взаимосвязанных аппаратно-программных блоков, построенных на основе специализированного оборудования SpaceWire.

б) Во второй части представлено исследование, связанное с

разработкой алгоритмов функционирования системы моделирования. Среди алгоритмов в качестве ключевых выделяются:

– алгоритм передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков, обеспечивающий решение задачи по обработке информации об особенностях функционирования конечных узлов, определяемых протоколами информационного взаимодействия отечественных КА;

– алгоритм расчета положений искажений в передаваемых данных, обеспечивающий решение задачи по обработке информации о внешних факторах, воздействующих на элементы систем на базе SpaceWire в условиях космического пространства.

в) В третьей части представлена методика исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов, предоставляющая статистическое обеспечение анализа развития информационного взаимодействия в системах на базе SpaceWire.

4) Проведена экспериментальная отработка комплекса моделирования, по результатам которой подтверждена ее адекватность и выявлен ряд преимуществ по сравнению с аналогами.

По результатам диссертационного исследования рекомендуется применение предложенных алгоритмов при создании систем на базе SpaceWire перспективных автоматических КА на предприятиях, занимающихся созданием космических комплексов и их составных частей. В планах дальнейших исследований стоит расширение функциональных характеристик комплекса моделирования:

– моделирование работы механизма планирования транспортного протокола СТП-ИСС;

– моделирование отказов и сбоев элементов систем (оконечные узлы, маршрутизирующие коммутаторы) с последующим переходом на резервные комплекты;

– моделирование работы смешанных систем, построенных на основе технологий SpaceWire и SpaceFibre.

Приобретение данных функциональных характеристик позволят комплексу решать новые задачи, ставящиеся в процессе создания систем на базе SpaceWire, что будет свидетельствовать о ее развитии.

Приложения диссертации содержат информацию об алгоритмах проведения автономного тестирования бортовой аппаратуры на соответствие требованиям стандарта SpaceWire (Приложение А), стандарта RMAP (Приложение Б), спецификации СТП-ИСС (Приложение В). Также содержится информация о полученных актах внедрения (Приложение Г).

Список сокращений и условных обозначений

| | |
|-----------|--|
| DSI | – Diagnostic SpaceWire Interface; |
| ECSS | – European Cooperation for Space Standardization; |
| EEP | – Error end of packet; |
| EOP | – End of packet; |
| ESA | – European Space Agency; |
| iSAFT-PVS | – iSAFT Protocol Testing and Validation System; |
| JAXA | – Japan Aerospace Exploration Agency; |
| JUICE | – Jupiter Icy Moons Explorer; |
| LRO | – Lunar Reconnaissance Orbiter; |
| MOST | – Modeling of SpaceWire Traffic; |
| MSR | – Multi-link SpaceWire Recorder; |
| NASA | – National Aeronautics and Space Administration; |
| N-Char | – Normal character; |
| NDCP | – Network Discovery and Configuration Protocol; |
| OSI | – Open Systems Interconnection; |
| RMAP | – Remote memory access protocol; |
| SANDS | – SpaceWire Automated NetWork Design and Simulation; |
| SHINe | – Simulator for HIgh-speed Networks; |
| SWIS | – SpaceWire Interface Simulator |
| VIPE | – Visual Integrated Development Environment; |
| AM | – Аналитическая модель; |
| АССИСТ | – Аэрокосмический стенд SpaceWire для исследования, сертификации и тестирования; |
| БА | – Бортовая аппаратура; |
| БПО | – Бортовое программное обеспечение; |
| ГАМ | – Групповая адаптивная маршрутизация; |
| ГКЛ | – Галактические космические лучи; |
| ЕРПЗ | – Естественные радиационные пояса Земли; |

| | |
|---------|---|
| ИП | – Информационный поток; |
| КА | – Космический аппарат; |
| КМ | – Комплекс моделирования; |
| МВП | – Модуля внешней памяти; |
| МК | – Маршрутизирующий коммутатор; |
| МКИО | – Мультиплексный канал информационного обмена; |
| НКУ | – Наземный комплекс управления; |
| ПЛИС | – Программируемая логическая интегральная схема; |
| ПН | – Полезная нагрузка; |
| СБИС | – Сверхбольшая интегральная схема; |
| СКЛ | – Солнечные космические лучи; |
| СПО | – Специальное программное обеспечение; |
| СТП-ИСС | – Сетевой транспортный протокол сети SpaceWire для КА АО «ИСС»; |
| ТЗЧ | – Тяжелая заряженная частица; |
| ЭВМ | – Электронная вычислительная машина. |

Список литературы

1. Ханов В.Х. Сетевые технологии для бортовых систем космического аппарата: опыт разработки / В.Х. Ханов // Доклады ТУСУР. – Томск, 2014. – № 2. – С. 287-293.
2. MIL-STD-1553B: Digital Time Division Command/Response Multiplex Data Bus. United States Department of Defense, September 1978.
3. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. Введ. 2004-01-01. – Москва: Госстандарт России, 2003.
4. Горбунов С.Ф. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения / С.Ф. Горбунов, В.Ю. Гришин, П.М. Еремеев // Наноиндустрия. – Москва, 2019. – Спец. выпуск. – С. 128-130.
5. ECSS-E-50-12A. Space engineering. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division. Noordwijk, The Netherlands.
6. ECSS-E-ST-50-12C Rev.1. Space engineering. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands.
7. ГОСТ Р 70020-2022. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. SpaceWire-RUS. Введ.2022-06-01. – Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2022.
8. Шейнин Ю.Е. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределительных комплексов / Ю.Е. Шейнин, Т.В. Солохина, Я.Я. Петричкович // Электроника: наука, технология, бизнес. – Москва, 2007. – № 1. – С. 38-49.
9. Lunar Reconnaissance Orbiter. [Электронный ресурс]. URL: <https://science.nasa.gov/mission/lro/> (дата обращения: 07.09.2023).

10. ExoMars. [Электронный ресурс]. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars (дата обращения: 07.09.2023).
11. BepiColombo. [Электронный ресурс]. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo (дата обращения: 07.09.2023).
12. Solar Orbiter. [Электронный ресурс]. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter (дата обращения: 07.09.2023).
13. Jupiter Icy Moons Explorer. [Электронный ресурс]. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice (дата обращения: 07.09.2023).
14. An Overview of the SpaceWire Standard. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.star-dundee.com/spacewire/getting-started/an-overview-of-the-spacewire-standard/> (дата обращения: 07.09.2023).
15. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 5-е изд. / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. – Санкт-Петербург: Питер, 2012. – 57 с.
16. Parkes S. SpaceWire User's Guide / Parkes S. – STAR-Dundee Limited, 2012. – 77 p.
17. Yi D. SpaceWire Standard and Improved Wormhole Router Design / D. Yi, L. Yu, H. Fei, X. Wang // IEEE Conference on Aerospace. – Big Sky, 2012.
18. Matveeva N. Routes Generation in On-board Space Data Systems with SpaceWire Networks / N. Matveeva, E. Suvorova, Y. Sheynin, S. Pakharev // European Conference for AeroSpace Sciences. – Milan, 2017.
19. ECSS-E-ST-50-51C. Space engineering. SpaceWire protocol identification. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.
20. Mendham P. Network management and configuration using RMAP / P. Mendham, S. Mills, S. Parkes // International SpaceWire Conference. – Dundee, 2007. – P. 119-129.

21. ECSS-E-ST-50-52C. Space engineering. SpaceWire – Remote memory access protocol. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.

22. Шейнин Ю.Е. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire / Ю.Е. Шейнин, В.Л. Оленев, И.Я. Лавровская, Д.В. ДЫМОВ, С.Г. Кочура // Исследования наукограда. – Железногорск, 2014. – № 1-2. – С. 21-30.

23. Korobkov I. Sheduling mechanisms for SpaceWire Networks / I. Korobkov, E. Podgornova, D. Raszhivin, V. Olenov, I. Lavrovskaya // Conference of Open Innovation Association FRUCT. – Yaroslavl, 2015. – P. 82-88.

24. Baron A. Benchmarking SpaceWire Networks / A. Baron, I. Walter, R. Ginosar, I. Keslassy // International SpaceWire Conference. – Dundee, 2007. – P. 153-160.

25. Baron A. SpaceWire Hot Modules / A. Baron, I. Walter, I. Cidon, R. Ginosar, I. Keslassy // International SpaceWire Conference. – Dundee, 2007. – P. 175-182.

26. Martin I. SpaceWire-cPCI VxWorks Support / I. Martin, S. Parkes, S. Mills // International SpaceWire Conference. – Dundee, 2007. – P. 253-258.

27. Raszhivin D. Deterministic Scheduling of SpaceWire Data Streams / D. Raszhivin, Y. Sheynin, A. Abramov // International SpaceWire Conference. – Gothenburg, 2013. – P. 141-144.

28. Zhou Q. Real-time Performance Simulation of SpaceWire Router with Polling Arbitration Schemes / Q. Zhou, L. Zhang, H. Lin // International SpaceWire Conference. – Gothenburg, 2013. – P. 180-183.

29. Yuasa T. A SpaceWire router architecture with non-blocking packet transfer mechanism / T. Yuasa, M. Nomachi, T. Takahashi, H. Hihara // International SpaceWire Conference. – Athens, 2014. – P. 213-219.

30. Mich W. Evaluation and Interoperability Testing of the SpaceWire-R Protocol / W. Mich, K. Romanowski, P. Tyczka, R. Renk, V. Kollias, N. Pogkas // International SpaceWire Conference. – Los Angeles, 2018. – P. 211-218.

31. Mills S. Testing over Ethernet with the SpaceWire GbE Brick / S. Mills, C. McClements, D. Paterson, P. Scott, S. Parkes // International SpaceWire Conference. – Los Angeles, 2018. – P. 11-16.
32. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – Москва: Издательство «Высшая школа», 2001. – 20 с.
33. Волкова А.А. Системный анализ и моделирование процессов в техносфере: Учебное пособие / А.А. Волкова, В.Г. Шишкунов. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. – 42 с.
34. Эльберг М.С. Имитационное моделирование: учебное пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганков. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. – 5 с.
35. Parkes S. SpaceFibre: Multiple Gbit/s Network Technology with QoS, FDIR and SpaceWire Packet Transfer Capabilities / S. Parkes, C. McClements, A. Ferrer, A. Gonzalez // International SpaceWire Conference. – Gothenburg, 2013. – P. 11-18.
36. Lu Zh. Unlocking the Power of OPNET Modeler / Zh. Lu, H. Yang. – Cambridge University Press, 2012. – 58 p.
37. NS-3 Network Simulator: official website. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nsnam.org/> (дата обращения: 02.06.2023).
38. Attanasio B. STP-ISS Assessment in Deterministic SpaceWire Network with MOSTNS3 SpaceWire Simulator / B. Attanasio, B. Dellandrea, E. Ballatore, D. Jameux // International SpaceWire and SpaceFibre Conference. – Pisa, 2022. – P. 49-52.
39. Dellandrea B. MOST: Modeling of SpaceWire traffic / B. Dellandrea, D. Jameux // International SpaceWire Conference. – Gothenburg, 2013. – P. 281-285.
40. Varga A. An overview of the OMNeT++ simulation environment / A. Varga, R. Hornig // International conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops. – Marseille, 2008.

41. Гостин А.М. Дискретная математика. Теория графов: учебное пособие / А.М. Гостин, В.П. Корячко. – Рязанский государственный радиотехнический университет, 2006. – 17 с.

42. Leoni A. Simulator for High-speed Networks (SHINe): an OMNeT++ simulator for SpaceFibre and SpaceWire Networks / A. Leoni, L. Fanucci, D. Jameux // International SpaceWire Conference. – Los Angeles, 2018. – P. 128-132.

43. Коробков И.Л. Иерархическое моделирование бортовых сетей SpaceWire / И.Л. Коробков, В.Л. Оленев, Н.И. Синев // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 220-225.

44. VIPE – визуальная интегрированная среда разработки переносимого программного обеспечения для встраиваемых многоядерных систем. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vipetech.ru/> (дата обращения: 03.12.2023).

45. Olenov V.L. SANDS tool for design and simulation of onboard networks / V.L. Olenov, I.L. Korobkov, N.Y. Chumakova, N.I. Sinyov // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Saint-Petersburg, 2021. – P. 1-8.

46. Van Leeuwen B. SpaceWire Model Development Technology for Satellite Architecture / B. Van Leeuwen, J. Eldridge, J. Leemaster // Sandia Report. – Albuquerque, 2011. – 12 p.

47. Mirabilis Design – SpaceWire. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mirabilisdesign.com/spacewire/> (дата обращения: 06.04.2024).

48. Eganyan A. DCNSimulator – Software Tool for SpaceWire Networks Simulation / A. Eganyan, E. Suvorova, Y. Sheynin, K. Khakhulin, I. Orlovsky // International SpaceWire Conference. – Gothenburg, 2013. – P. 216-221.

49. ECSS-E-ST-50-54. Space engineering. SpaceWire Network Discovery & Configuration Protocol. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.

50. Holubowicz W. SPACEMAN: A SpaceWire Network Management Tool / W. Holubowicz, P. Lanchmanski, K. Romanowski, V. Kollias, N. Pogkas // International SpaceWire Conference. – Athens, 2014. – P. 99-102.

51. Hayama M. Impacts of Faults on a SpaceWire Network / M. Hayama, Y. Yokoyama, R. Yagi, I. Odagi, H. Namikoshi // International SpaceWire Conference. – Athens, 2014. – P. 90-94.

52. STAR-Dundee: official website. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.star-dundee.com/> (дата обращения: 02.08.2023).

53. 4Links: official website. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.4links.co.uk/index.php> (дата обращения: 02.08.2023).

54. Teletel: official website. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.teletel.eu/> (дата обращения: 02.08.2023).

55. МиТ: официальный сайт. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spacewire.ru/mit> (дата обращения: 02.08.2023).

56. Dynamic Engineering: official website. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dyneng.com/index.html> (дата обращения: 02.08.2023).

57. ShimaFuji Electric Incorporated: official website. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dyneng.com/index.html> (дата обращения: 02.08.2023).

58. VXI-Системы: официальный сайт. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vxisystems.ru/> (дата обращения: 02.08.2023).

59. SpaceWire Brick Mk4. [Электронный ресурс]. URL: https://www.star-dundee.com/products/spacewire-brick-mk4/#product_features (дата обращения: 06.05.2024).

60. RG400 DSI. Diagnostic SpaceWire Interface for Advanced Monitoring and Analysis. [Электронный ресурс]. URL: <https://4links.space/rg400-dsi/> (дата обращения: 06.05.2024).

61. SpaceWire Front-End / Link Analyser. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.teletel.eu/products/data-front-ends-link-analysers/spacewire-front-end-link-analyser/> (дата обращения: 06.05.2024).

62. Мост Ethernet-SpaceWire. [Электронный ресурс]. URL: https://www.spacewire.ru/spw-eth_bridge (дата обращения: 06.05.2024).

63. SpaceWire-to-GigabitEtherR2. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dimacred.com/wp-content/uploads/2018/06/Shimafuji-SpaceWire-to-GigabitEtherR2-.pdf> (дата обращения: 06.05.2024).

64. SpaceWire Router Mk2S. [Электронный ресурс]. URL: https://www.star-dundee.com/products/spacewire-router-mk2s/#product_features (дата обращения: 06.05.2024).

65. Flexible SpaceWire Router FSR-RG408. [Электронный ресурс]. URL: <https://satsearch.co/products/4links-ltd-flexible-space-wire-router-fsr-rg408> (дата обращения: 06.05.2024).

66. Микросхемы контроллера сетевого информационно-управляющего интерфейса 1931BK024, 1931BK024A, 1931KX014. [Электронный ресурс]. URL: <https://mikron.ru/products/high-rel-ic/Interface-chips/spacewire/product/1931vk024-1931vk024a-1931kh014/?lang=ru> (дата обращения: 06.05.2024).

67. SpaceWire Link Analyser Mk3. [Электронный ресурс]. URL: https://www.star-dundee.com/products/spacewire-link-analyser-mk3/#product_features (дата обращения: 06.05.2024).

68. SpaceWire Recorder Mk2. [Электронный ресурс]. URL: https://www.star-dundee.com/products/spacewire-recorder-mk2/#product_features (дата обращения: 06.05.2024).

69. RG400 MSR. 4Links Multi-link SpaceWire Recorder for Application Monitoring. [Электронный ресурс]. URL: <https://4links.space/rg400-msr/> (дата обращения: 06.05.2024).

70. SpaceWire Monitor. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dyneng.com/SpaceWire-Monitor.html> (дата обращения: 06.05.2024).

71. Peter G. SpaceWire Interface Simulation / G. Peter, U. Rohbeck, R. Berlin, N. Russ, B. Ulmer // IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. – Pasadena, 2006. – P. 202-207.

72. Tavoularis A. iSAFT-PVS: Recording, Simulation & Traffic Generation at Full Network Load / A. Tavoularis, V. Vlagkoulis, N. Pogkas, V. Kollias, K. Marinis // International SpaceWire Conference. – Athens, 2014. – P. 73-79.

73. Parkes S. SpaceWire-D: Deterministic Data Delivery with SpaceWire / S. Parkes, A. Ferrer, S. Mills, A. Mason // International SpaceWire Conference. Saint-Petersburg, 2010. – P. 31-39.

74. Parkes S. The Next Generation of Spaceflight Processors: Low Power, High Performance, with Integrated SpaceWire Router and Protocol Engines / S. Parkes, C. McClements, G. Mantelet, N. Ganry // International Astronautical Congress. Beijing, 2013.

75. Gibson D. SpaceWire-D on the Castor Spaceflight Processor / D. Gibson, S. Parkes, C. McClements, S. Mills, D. Paterson // International SpaceWire Conference. – Athens, 2014. – P. 220-226.

76. SpW-10X Architecture. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.star-dundee.com/spacewire/spacewire-users-guide/spacewire-networks/example-spacewire-router/spw-10x-architecture/> (дата обращения: 06.05.2024).

77. Peel R. Determining the Behaviour of Black-Box SpaceWire Components / R. Peel, P. Walker, B. Cook, D. Jameux // International SpaceWire Conference. – Gothenburg, 2013. – P. 49-54.

78. Голубев Е.Н. Экспериментальная отработка приборов бортового комплекса управления с каналом SpaceWire / Е.Н. Голубев, А.А. Зайцев // Решетневские чтения. – Красноярск, 2016. – Т. 1. – С. 330-332.

79. Радиационно стойкие микросхемы. [Электронный ресурс]. URL: <https://elvees.ru/chip/rad-tolerant-and-spacewire> (дата обращения: 06.05.2024).

80. Синев Н.И. Аппаратно-программная отработка коммуникационных протоколов для бортовых сетей / Н.И. Синев, А.А. Карандашев, В.Л. Оленев,

Н.Ю. Чумакова, А.Ю. Сыщиков // Системный анализ и логика. – Санкт-Петербург, 2022. – № 1. – С. 44-62.

81. Pugh Matrix (PM). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.burgehugheswalsh.co.uk/uploaded/1/documents/pugh-matrix-v1.1.pdf> (дата обращения: 06.05.2024).

82. Максютин А.С. Концепция построения стенда для тестирования бортовой аппаратуры SpaceWire с возможностью программного и аппаратного моделирования реконфигурируемой топологии бортовой сети космического аппарата / А.С. Максютин, А.В. Мурыгин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение. – Москва, 2023. – № 2 (145). – С. 4-14.

83. Максютин А.С. Разработка программно-аппаратных имитаторов трафика SpaceWire для испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов / А.С. Максютин, Д.С. Казайкин, Д.В. Дымов // Решетневские чтения. – Красноярск, 2022. – Т. 1. – С. 361-363.

84. Поляков В.И. Основы теории алгоритмов: Учебное пособие по дисциплине «Математическая логика и теория алгоритмов» / В.И. Поляков, В.И. Скорубский. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО, 2012. – 4 с.

85. ГОСТ 19.701-90. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. Введ. 1992-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2010.

86. Полосков И.Е. Теория случайных процессов: курс лекций и практикум / И.Е. Полосков. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. – 46 с.

87. Горчаков Л.В. Введение в компьютерное моделирование: Учебное пособие / Л.В. Горчаков. – Томск: Редакционно-издательский отдел Томского университета, 2012. – 24 с.

88. Кузнецов Н.В. Радиационная опасность на околоземных орбитах и межпланетных траекториях космических аппаратов. [Электронный ресурс]. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd/crd2.htm> (дата обращения: 07.09.2023).

89. ОСТ 134-1044-2007. Методы расчета радиационных условий на борту космических аппаратов и установления требований по стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию заряженных частиц космического пространства естественного происхождения. Введ. 2007. – Москва: АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», 2007.

90. Задорожный В.Н. Имитационное и статистическое моделирование: Учебное пособие / В.И. Игошин. – Омск: Издательство ОмГТУ, 2013. – 18 с.

91. Максютин А.С. Разработка программного обеспечения для сетевого анализатора каналов SpaceWire / А.С. Максютин, Д.С. Казайкин, Д.В. Дымов // Электронные средства и системы управления. – Томск, 2023. – № 1-1. – С. 14-17.

92. Максютин А.С. Анализ информационного взаимодействия в каналах сети SpaceWire / А.С. Максютин, А.В. Мурыгин // Вестник Пермского Национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – Пермь, 2023. – № 75. – С. 16-25.

93. Максютин А.С. Методика тестирования бортовой информационной сети SpaceWire / А.С. Максютин // Гагаринские чтения. – Москва, 2024. С. 181-182.

94. Спириин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, ЛА. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурыкин. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 173.

95. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности: Руководство по применению / Б.Ю. Лемешко. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – 122 с.

96. Задорожная Е.А. Теория планирования эксперимента: Учебное пособие / Е.А. Задорожная. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 10 с.

97. Трофимова Е.А. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / Е.А. Трофимова, Н.В. Кисляк, Д.В. Гилев. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. – 106 с.

98. Максютин А.С. Система определения степени зависимости сетевых характеристик каналов SpaceWire от параметров информационного взаимодействия / А.С. Максютин, А.В. Мурыгин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – Уфа, 2024. – Т. 28, № 3. – С. 3-13.

99. Калинина В.Н. Математическая статистика / В.Н. Калинина, В.Ф. Панкин. – Москва: Издательство «Дрофа», 2002. – 266 с.

100. Максютин А.С. Разработка рабочего места и алгоритмов тестирования бортового оборудования SpaceWire / А.С. Максютин, А.В. Мурыгин, Д.В. Ивлеников, Д.В. Дымов // Сибирский аэрокосмический журнал. – Красноярск, 2021. – Т. 22, № 4. – С. 613-623.

101. Дымов Д.В. Комплект СБИС для построения бортовых сетей SpaceWire / Д.В. Дымов, В.И. Эннс, А.В. Эннс, Д.С. Казайкин, В.В. Полещук, А.С. Андреев, А.В. Леонова // Наноиндустрия. – Москва, 2020. – № S96-1. – С. 190-199.

102. Максютин А.С. Применение аппаратно-программного комплекса автономного тестирования узла SpaceWire для проведения испытаний СБИС контроллера информационно-управляющего интерфейса / А.С. Максютин, Д.С. Казайкин, Д.В. Дымов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – Москва, 2023. – Т. 10, № 2. – С. 63-72.

103. Максютин А.С. Разработка методики тестирования сетевых коммутаторов SpaceWire / А.С. Максютин, Д.С. Казайкин, Д.В. Дымов, Д.В. Ивлеников // Сибирский аэрокосмический журнал. – Красноярск, 2022. – Т. 23, № 2. – С. 197-208.

104. Максютин А.С. Разработка алгоритмов тестирования оборудования SpaceWire на соответствие требованиям спецификации транспортного протокола RMAP / А.С. Максютин // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика. – Красноярск, 2022. – С. 80-86.

105. Maksyutin A.S. Algorithms for testing SpaceWire equipment in compliance with RMAP protocol specification / A.S. Maksyutin // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – Красноярск, 2022. – № 21. – С. 281-283.

106. Максютин А.С. Разработка рабочего места для исследования передачи информации с использованием механизмов СТП-ИСС / А.С. Максютин, М.А. Кирилкин, И.О. Осипов, Д.В. Ивленков // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – Томск, 2021. – № 1-2. – С. 148-150.

107. Алексеева К.И. Аналитическая модель расчета задержек передачи пакетов данных в бортовых сетях SpaceWire / К.И. Алексеева, В.Л. Оленев // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 261-264.

Приложение А

Алгоритмы проверок маршрутизирующих коммутаторов на соответствие требованиям стандарта SpaceWire

Для проведения тестов, обозначенных в разделе «Автономное тестирование элементов систем на базе SpaceWire» третьей главы диссертационного исследования, применяются аппаратно-программные средства, обозначенные в таблице 1.

Таблица 1 – Аппаратно-программные средства для тестирования маршрутизирующих коммутаторов на соответствие требованиям стандарта SpaceWire

| Номер | Аппаратно-программные средства | Назначение |
|-------|-------------------------------------|---|
| 1 | Персональный компьютер | Управление процессом тестирования |
| 2 | Специальное программное обеспечение | Формирование тестовых последовательностей |
| 3 | DSI | Отправка тестовых последовательностей |
| 4 | Маршрутизирующий коммутатор | Тестируемый элемент системы |

Маршрутизирующий коммутатор подключается к DSI с помощью двух кабелей SpaceWire, оставшиеся свободными порты замыкаются loopback-кабелями SpaceWire. Структурная схема для проведения тестирования маршрутизирующего коммутатора представлена на рисунке 1.

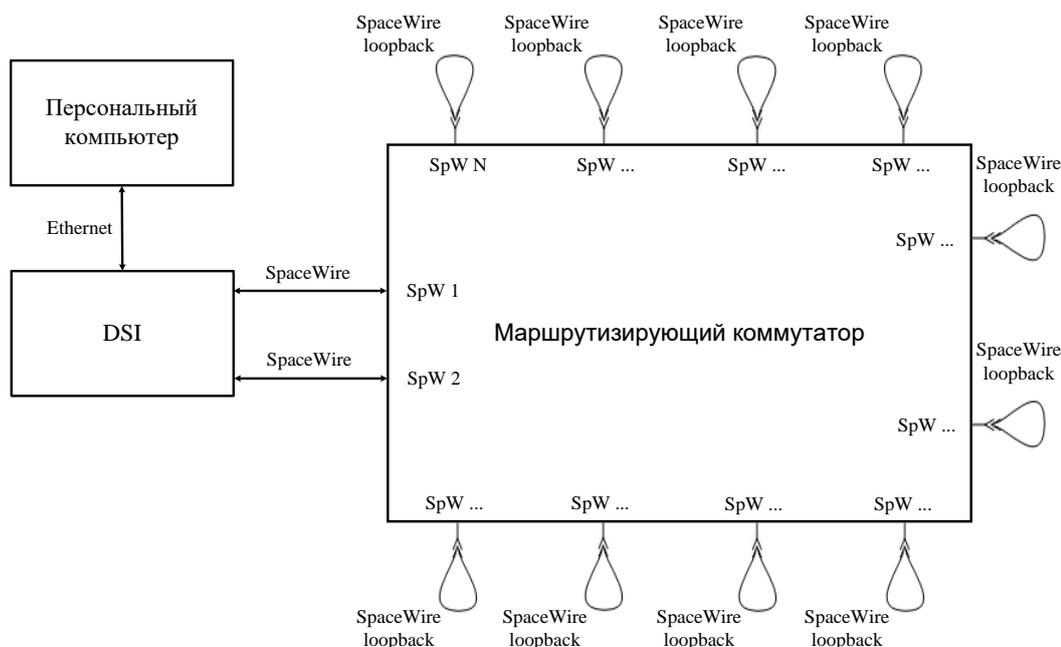


Рисунок 1 – Структурная схема для проведения тестирования маршрутизирующего коммутатора

1) Алгоритм проверки поддержки механизма перенаправления пакета с входного порта, принявшего пакет, на выходной порт, определенный в соответствии с адресом назначения (пункт 8.2.3).

Данная проверка подразделяется на две части:

а) Проверка путевой адресации. Запускается цикл проверок, число итераций которого равняется числу портов маршрутизирующего коммутатора. Одна проверка состоит из следующей последовательности действий. С DSI передается целевой пакет, адрес назначения которого состоит из двух идентификаторов:

- идентификатор, соответствующий номеру одного из портов маршрутизирующего коммутатора (определен в таблице маршрутизации при предварительной конфигурации);
- идентификатор, соответствующий номеру порта маршрутизирующего коммутатора, подключенному к DSI.

После передачи целевого пакета запускается таймер ожидания его приема с двумя отсутствующими идентификаторами, т.к. они должны быть

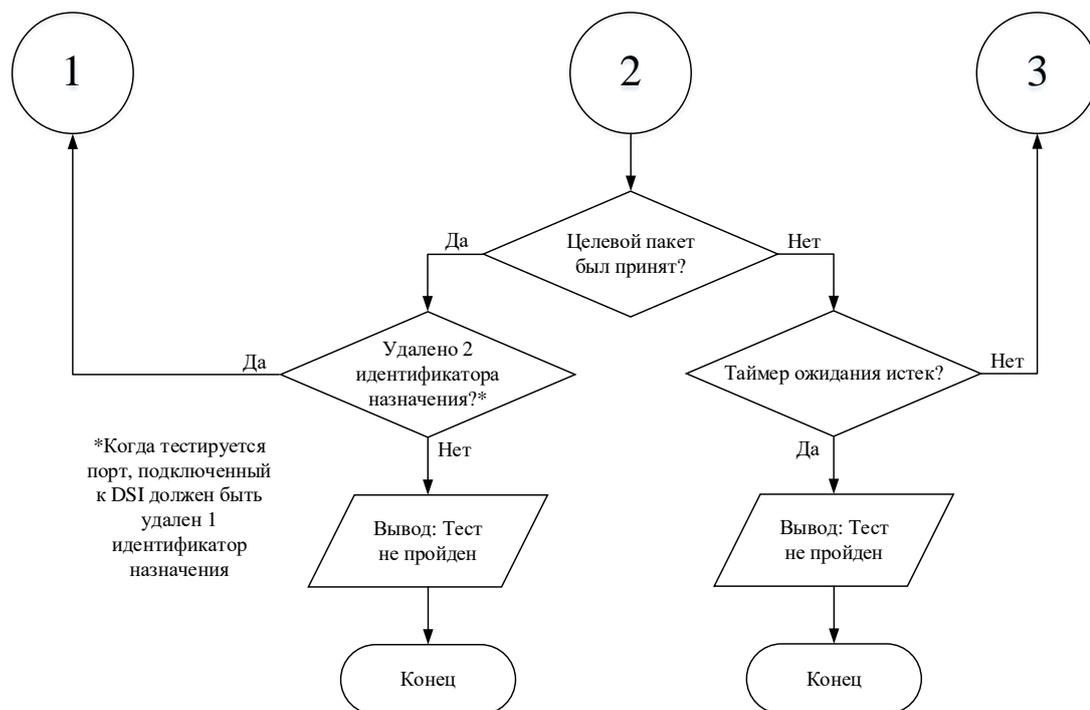


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма проверки поддержки механизма перенаправления пакета с входного порта, принявшего пакет, на выходной порт, определенный в соответствии с адресом назначения (путевая адресация)

б) Проверка логической адресации. Для проведения проверки маршрутизирующего коммутатора осуществляется предварительная конфигурация строк его таблицы маршрутизации. Число конфигурируемых строк соответствует числу портов маршрутизирующего коммутатора. Для каждой строки задается следующая конфигурация: передача принятого на входной порт пакета на выходной порт с требованием удаления заголовка.

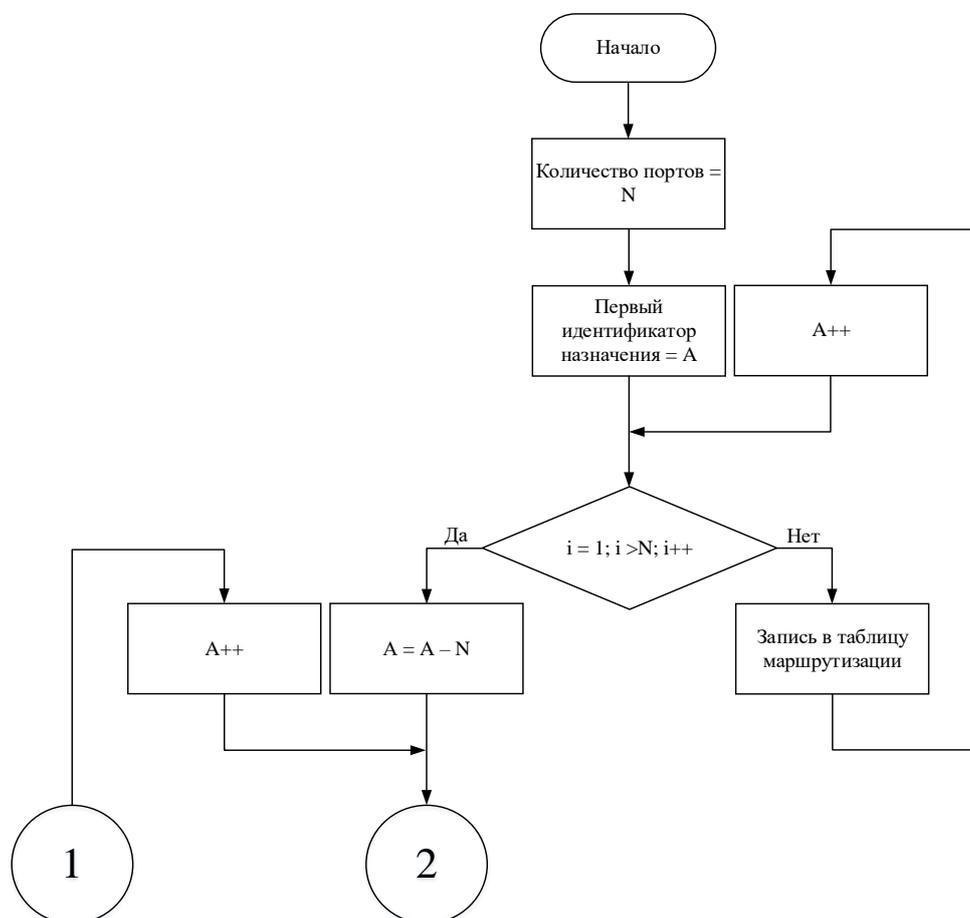
Далее запускается цикл проверок, число итераций которого равняется числу портов маршрутизирующего коммутатора. Одна проверка состоит из следующей последовательности действий. С DSI передается целевой пакет, адрес назначения которого состоит из двух идентификаторов:

- идентификатор, соответствующий номеру одного из портов маршрутизирующего коммутатора (определен в таблице маршрутизации при предварительной конфигурации);

– идентификатор, соответствующий номеру порта маршрутизирующего коммутатора, подключенному к DSI.

После передачи целевого пакета запускается таймер ожидания его приема с двумя отсутствующими идентификаторами, т.к. они должны быть удалены маршрутизирующим коммутатором за исключением случаев, когда проверяются порты, которые подключены к DSI – тогда должен отсутствовать один идентификатор. В случае если обозначенные условия выполняются, то осуществляется переход к следующей итерации цикла проверок. Когда все итерации цикла проверок проходят, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки поддержки механизма перенаправления пакета с входного порта, принявшего пакет, на выходной порт, определенный в соответствии с адресом назначения (логическая адресация), приведена на рисунке 3.



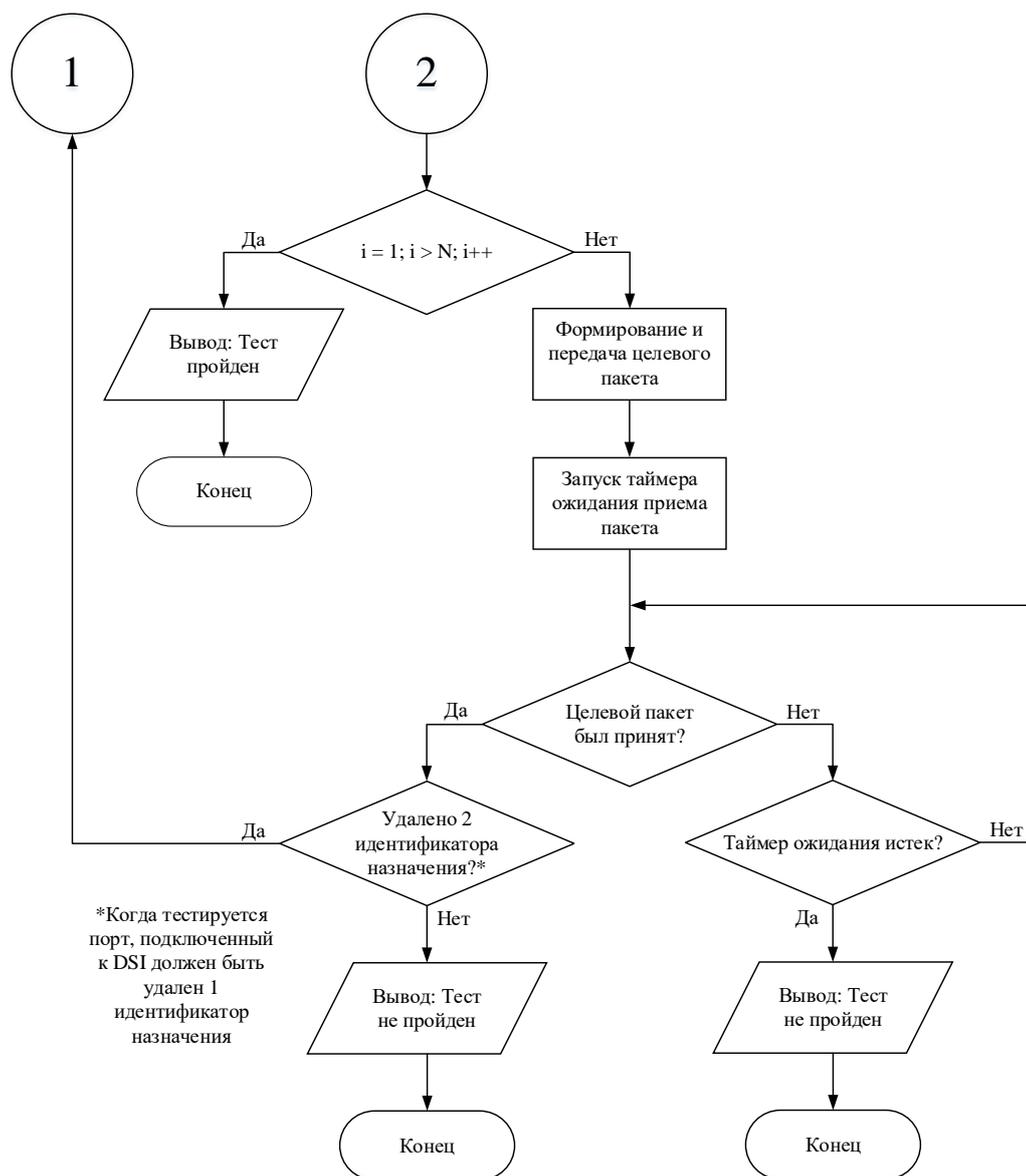


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма проверки поддержки механизма перенаправления пакета с входного порта, принявшего пакет, на выходной порт, определенный в соответствии с адресом назначения (логическая адресация)

2) Проверка поддержки механизма арбитража (пункт 8.2.5 стандарта).

Для проведения проверки маршрутизирующего коммутатора осуществляется предварительная конфигурация строк его таблицы маршрутизации. Число конфигурируемых строк соответствует числу портов маршрутизирующего коммутатора. Для каждой строки задается следующая конфигурация: передача принятого на входной порт пакета на выходной порт

с требованием удаления заголовка и с установкой уровня приоритета выше базового.

Далее запускается цикл проверок, число итераций которого равняется числу портов маршрутизирующего коммутатора. Одна проверка состоит из следующей последовательности действий. С DSI передается нагрузочный пакет большого объема для одного из портов маршрутизирующего коммутатора. Данный пакет блокирует порт на некоторое время, из-за чего прочие пакеты, также претендующие на этот порт, будут вынуждены ожидать его освобождения.

После этого с двух портов DSI с небольшой относительно друг друга задержкой передаются еще два пакета – тестовый и целевой. Адрес назначения тестового пакета состоит из двух идентификаторов:

- идентификатор, соответствующий номеру одного из портов маршрутизирующего коммутатора (заблокирован в этот момент);

- идентификатор, соответствующий номеру порта маршрутизирующего коммутатора, подключенному к DSI.

Адрес назначения целевого пакета состоит из двух идентификаторов:

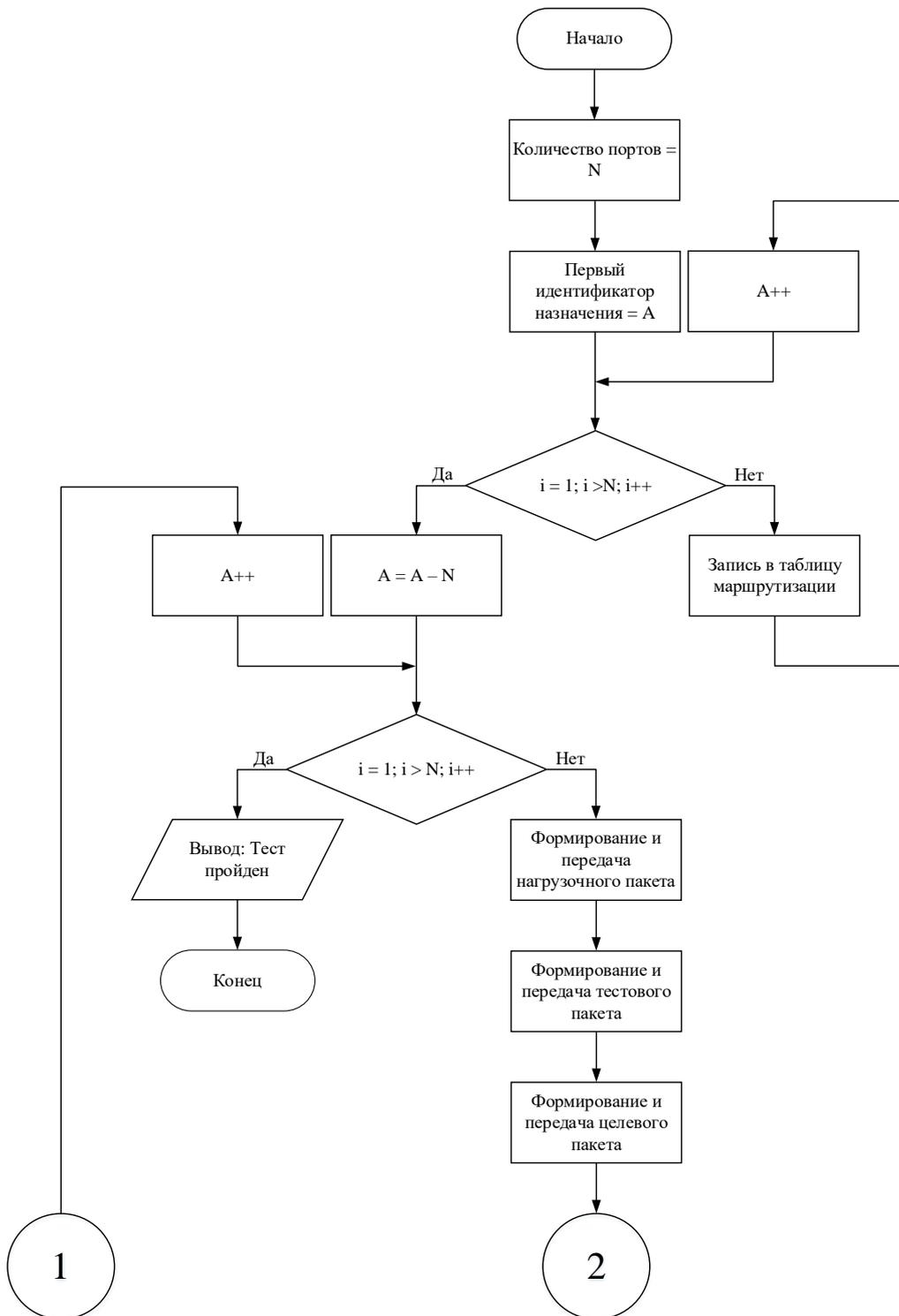
- идентификатор, соответствующий номеру одного из портов маршрутизирующего коммутатора (определен в таблице маршрутизации при предварительной конфигурации, заблокирован в этот момент);

- идентификатор, соответствующий номеру порта маршрутизирующего коммутатора, подключенному к DSI.

После передачи тестового и целевого пакетов запускается таймер ожидания их приема с двумя отсутствующими идентификаторами, так как они должны быть удалены маршрутизирующим коммутатором за исключением случаев, когда проверяются порты, которые подключены к DSI – тогда должен отсутствовать один идентификатор. Целевой пакет должен прийти первым относительно тестового, несмотря на более позднюю передачу, т.к. для него задан более высокий уровень приоритета. В случае если обозначенные условия выполняются, то осуществляется переход к

следующей итерации цикла проверок. Когда все итерации цикла проверок проходят, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки поддержки механизма арбитража приведена на рисунке 4.



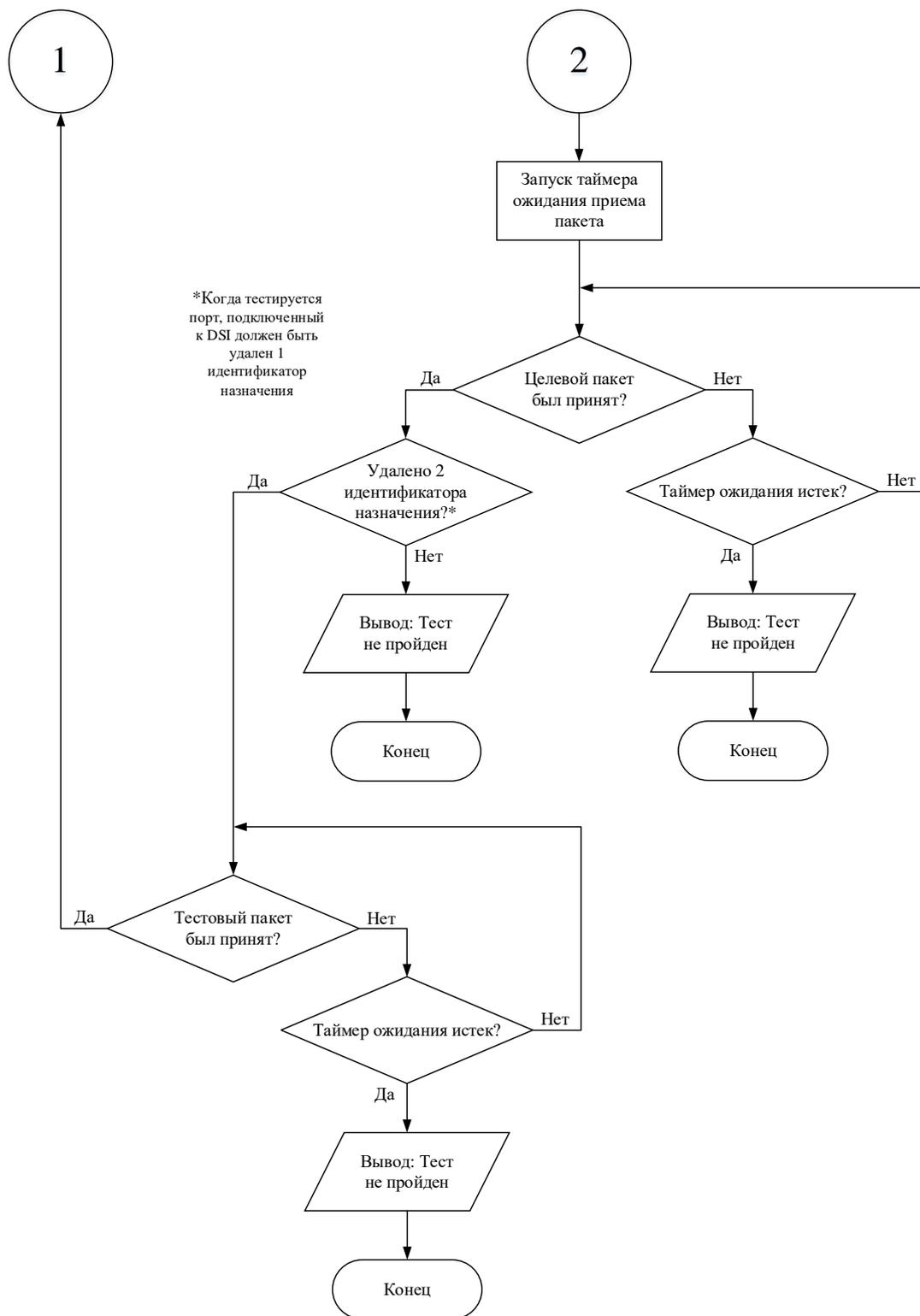


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма проверки поддержки механизма арбитража

3) Алгоритм проверки поддержки механизма адаптивной групповой маршрутизации (пункт 8.2.6 стандарта).

Для проведения проверки маршрутизирующего коммутатора осуществляется предварительная конфигурация строк его таблицы маршрутизации. Число конфигурируемых строк соответствует числу портов маршрутизирующего коммутатора. Для каждой строки задается следующая конфигурация: передача принятого на входной порт пакета на два выходных порта с требованием удаления заголовка и с признаком адаптивной групповой маршрутизации:

- первый порт с высоким приоритетом при адаптивной групповой маршрутизации;

- второй порт с низким приоритетом при адаптивной групповой маршрутизации (подключен к DSI).

Когда первый порт сам подключен к DSI, вторым портом является любой другой порт маршрутизирующего коммутатора.

Далее запускается цикл проверок, число итераций которого равняется числу портов маршрутизирующего коммутатора. Одна проверка состоит из двух следующих последовательностей действий:

- а) С DSI передается целевой пакет, адрес назначения которого состоит из двух идентификаторов:

- идентификатор, соответствующий номерам двух портов маршрутизирующего коммутатора (определен в таблице маршрутизации при предварительной конфигурации);

- идентификатор, соответствующий номеру порта маршрутизирующего коммутатора, подключенному к DSI.

После передачи целевого пакета запускается таймер ожидания его приема с двумя отсутствующими идентификаторами, т.к. они должны быть удалены маршрутизирующим коммутатором за исключением случаев, когда проверяются порты, которые подключены к DSI – тогда должен отсутствовать один идентификатор. В случае если обозначенные условия выполняются, то осуществляется переход к следующей последовательности действий.

б) С DSI передается нагрузочный пакет большого объема для одного из портов маршрутизирующего коммутатора. Данный пакет заблокирует порт на некоторое время, из-за чего прочие пакеты, также претендующие на этот порт, будут вынуждены ожидать его освобождения.

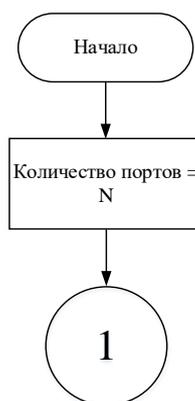
После этого с порта DSI передается целевой пакет. Адрес назначения целевого пакета состоит из двух идентификаторов:

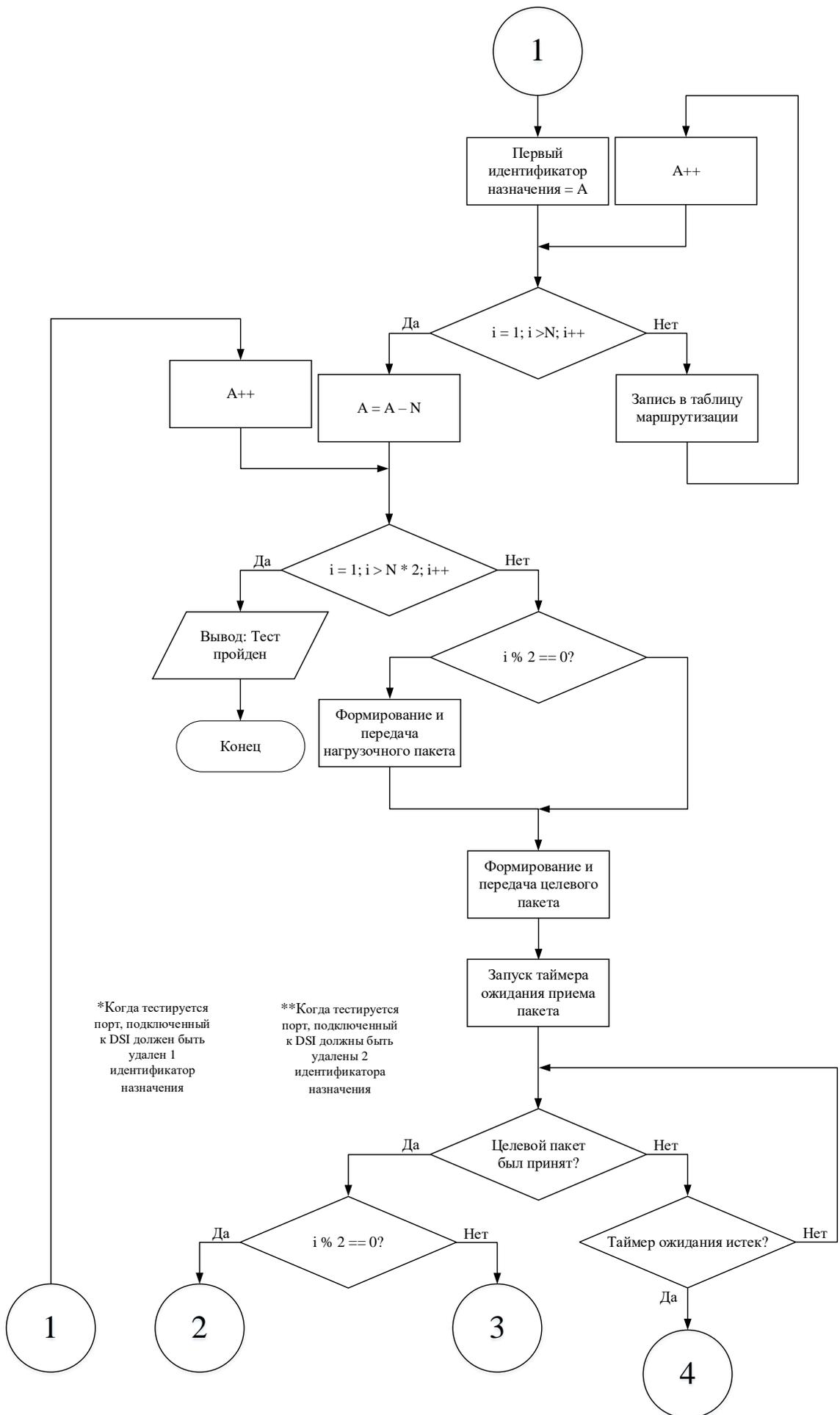
– идентификатор, соответствующий номерам двух портов маршрутизирующего коммутатора (определен в таблице маршрутизации при предварительной конфигурации, первый из портов заблокирован в этот момент);

– идентификатор, соответствующий номеру порта маршрутизирующего коммутатора, подключенному к DSI.

После передачи целевого пакета запускается таймер ожидания его приема с одним отсутствующим идентификатором, т.к. он должен быть удален маршрутизирующим коммутатором за исключением случаев, когда проверяются порты, которые подключены к DSI – тогда должны отсутствовать два идентификатора. В случае если обозначенные условия выполняются, то осуществляется переход к следующей итерации цикла проверок. Когда все итерации цикла проверок проходят, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки механизма адаптивной групповой маршрутизации приведена на рисунке 5.





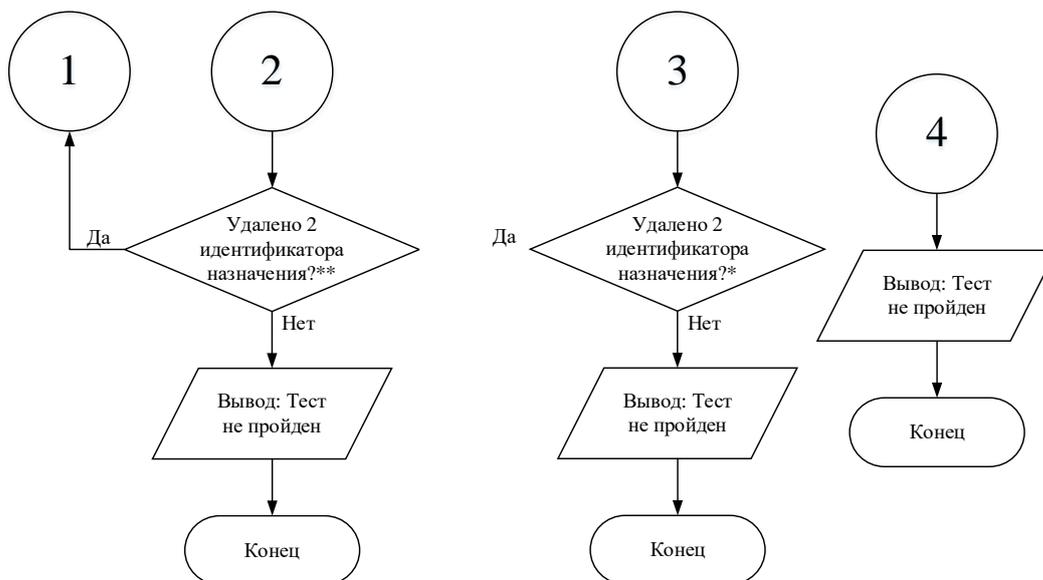


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма проверки механизма адаптивной групповой маршрутизации

4) Алгоритм проверки поддержки механизма группового вещания (пункт 8.2.7 стандарта).

Для проведения проверки маршрутизирующего коммутатора осуществляется предварительная конфигурация одной из строк его таблицы маршрутизации. Для данной строки задается следующая конфигурация: передача принятого на входной порт пакета на все выходные порты с требованием удаления заголовка.

Проверка состоит из следующей последовательности действий. С DSI передается целевой пакет, адрес назначения которого состоит из двух идентификаторов:

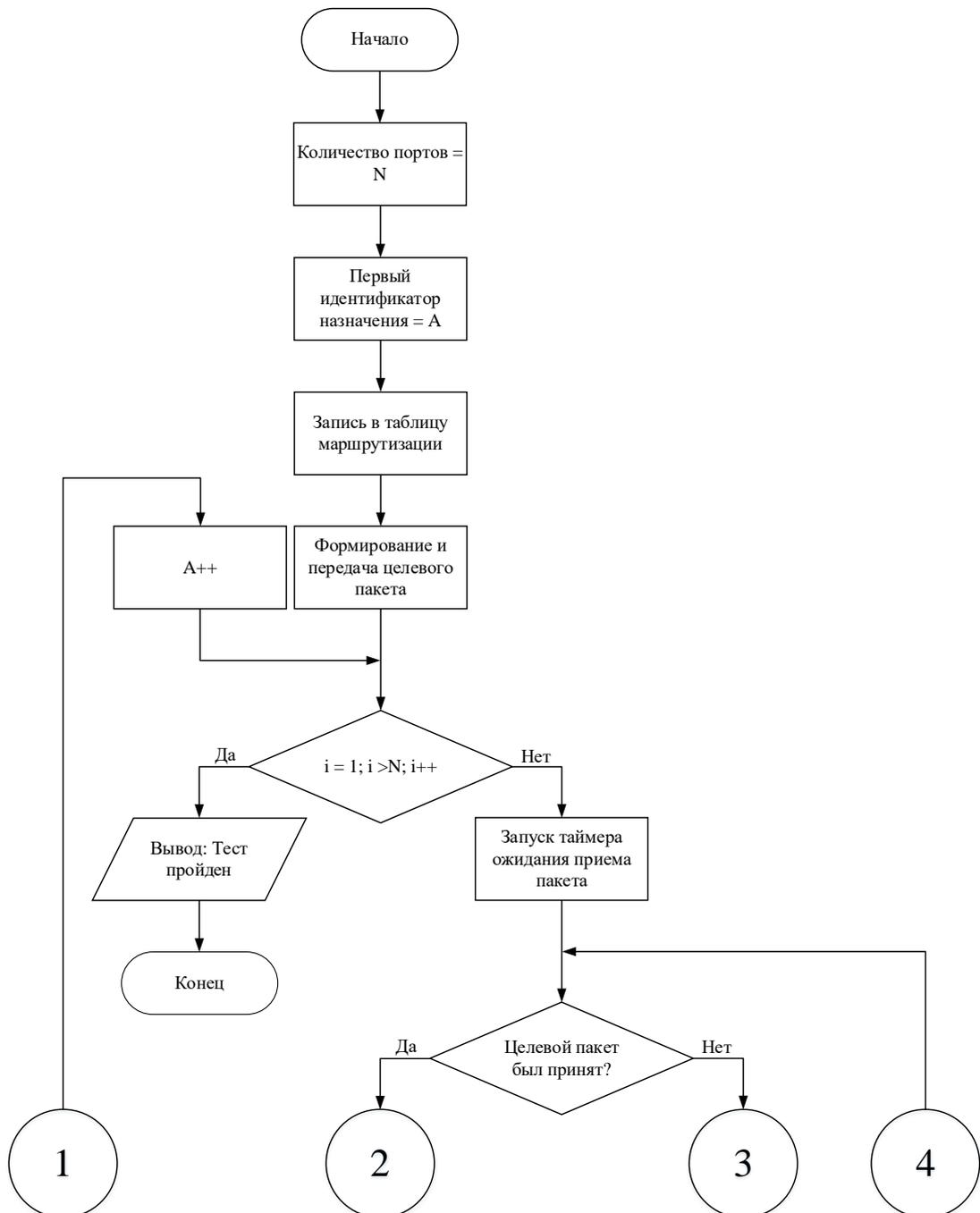
- идентификатор, соответствующий номеру одного из портов маршрутизирующего коммутатора (определен в таблице маршрутизации при предварительной конфигурации);

- идентификатор, соответствующий номеру порта маршрутизирующего коммутатора, подключенному к DSI.

После передачи целевого пакета запускается таймер ожидания приема его копий в числе равном числу портов маршрутизирующего коммутатора с

двумя отсутствующими идентификаторами, т.к. они должны быть удалены маршрутизирующим коммутатором за исключением двух копий, пришедших с портов, которые подключены к DSI – тогда должен отсутствовать один идентификатор. В случае если обозначенные условия выполняются, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки поддержки механизма группового вещания маршрутизирующего коммутатора приведена на рисунке 6.



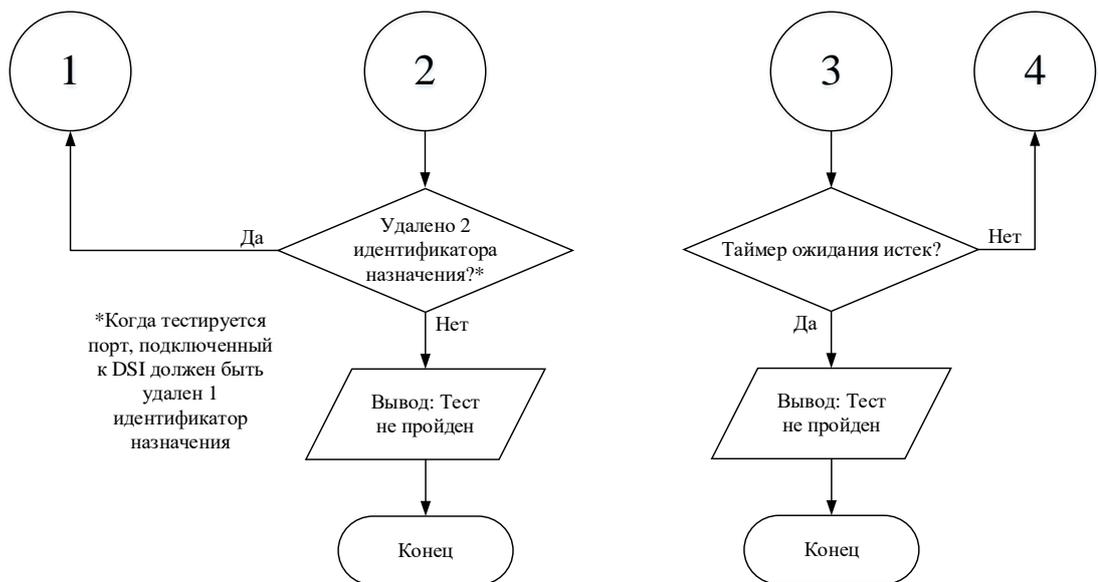


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма проверки поддержки механизма группового вещания маршрутизирующего коммутатора

Приложение Б

Алгоритмы проверок конечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов на соответствие требованиям стандарта RMAP

Для проведения тестов, обозначенных в разделе «Автономное тестирование элементов систем на базе SpaceWire» третьей главы диссертационного исследования, применяются аппаратно-программные средства, обозначенные в таблице 2.

Таблица 2 – Аппаратно-программные средства для тестирования конечных устройств и маршрутизирующих коммутаторов на соответствие требованиям стандарта RMAP

| Номер | Аппаратно-программные средства | Назначение |
|-------|--|---|
| 1 | Персональный компьютер | Управление процессом тестирования |
| 2 | Специальное программное обеспечение | Формирование тестовых последовательностей |
| 3 | DSI | Отправка тестовых последовательностей |
| 4 | Устройство с реализованным блоком RMAP | Тестируемый элемент системы |

Устройство с реализованным блоком RMAP подключается к DSI с помощью одного кабеля SpaceWire. Структурная схема для проведения тестирования устройства с реализованным блоком RMAP представлена на рисунке 7.

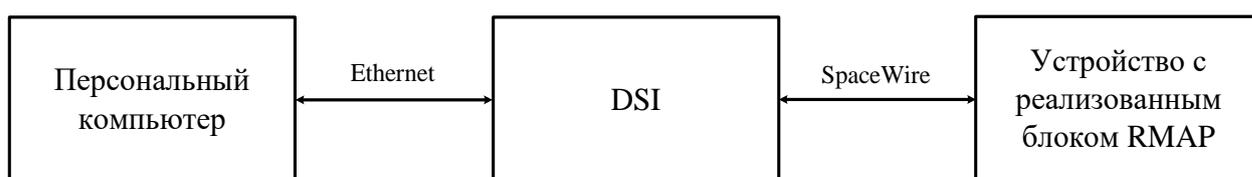


Рисунок 7 – Структурная схема для проведения тестирования устройства с реализованным блоком RMAP

1) Проверка корректности обработки трех типов команд (базовая проверка).

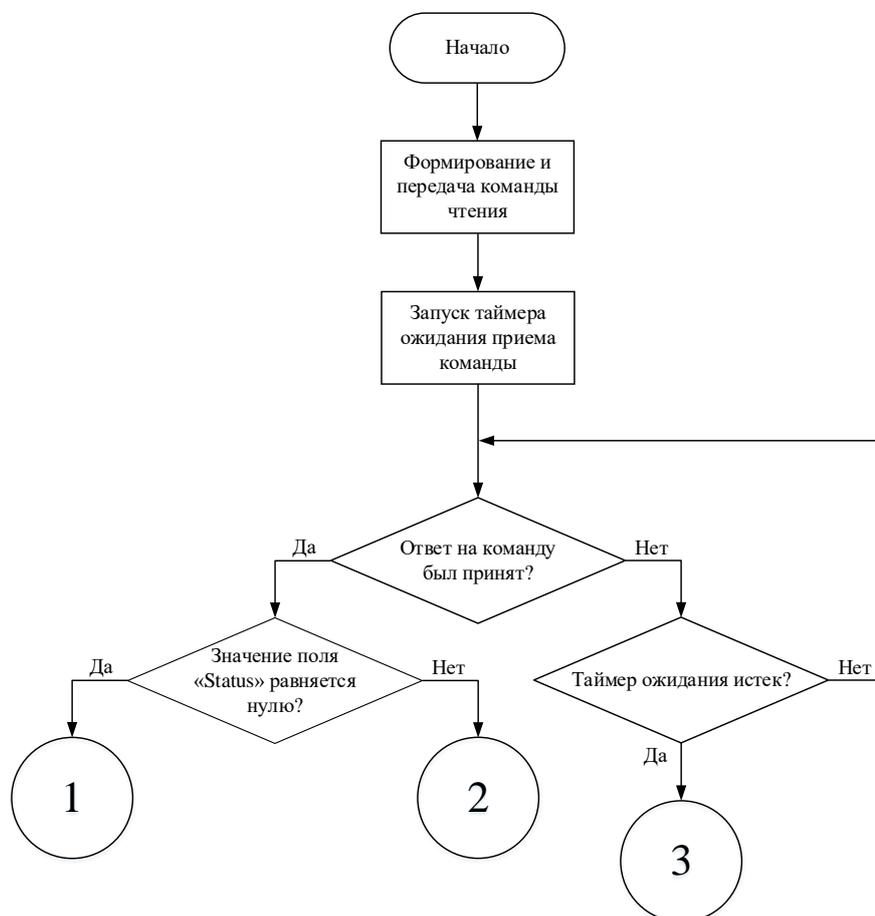
Проведение проверки проводится начиная с команды чтения. Для проведения проверки осуществляется выбор некоторой области памяти

тестируемого устройства. Из данной области памяти вычитываются содержащиеся в ней данные любым доступным способом.

а) Алгоритм проверки корректности обработки команды чтения (пункт 5.4).

Команда чтения формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. С DSI передается команда чтения. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, в котором в поле «Status» должно содержаться значение равное нулю, а в поле «Data» должны содержаться значения, равные тем, что были определены ранее другим способом. В случае если обозначенные условия выполняются, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки корректности обработки команды чтения представлена на рисунке 8.



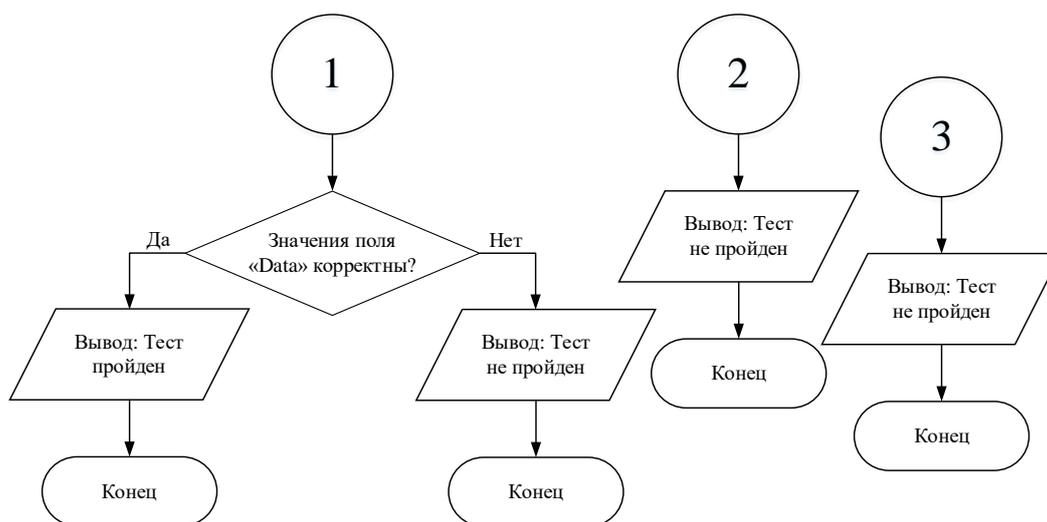


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма проверки корректности обработки команды чтения

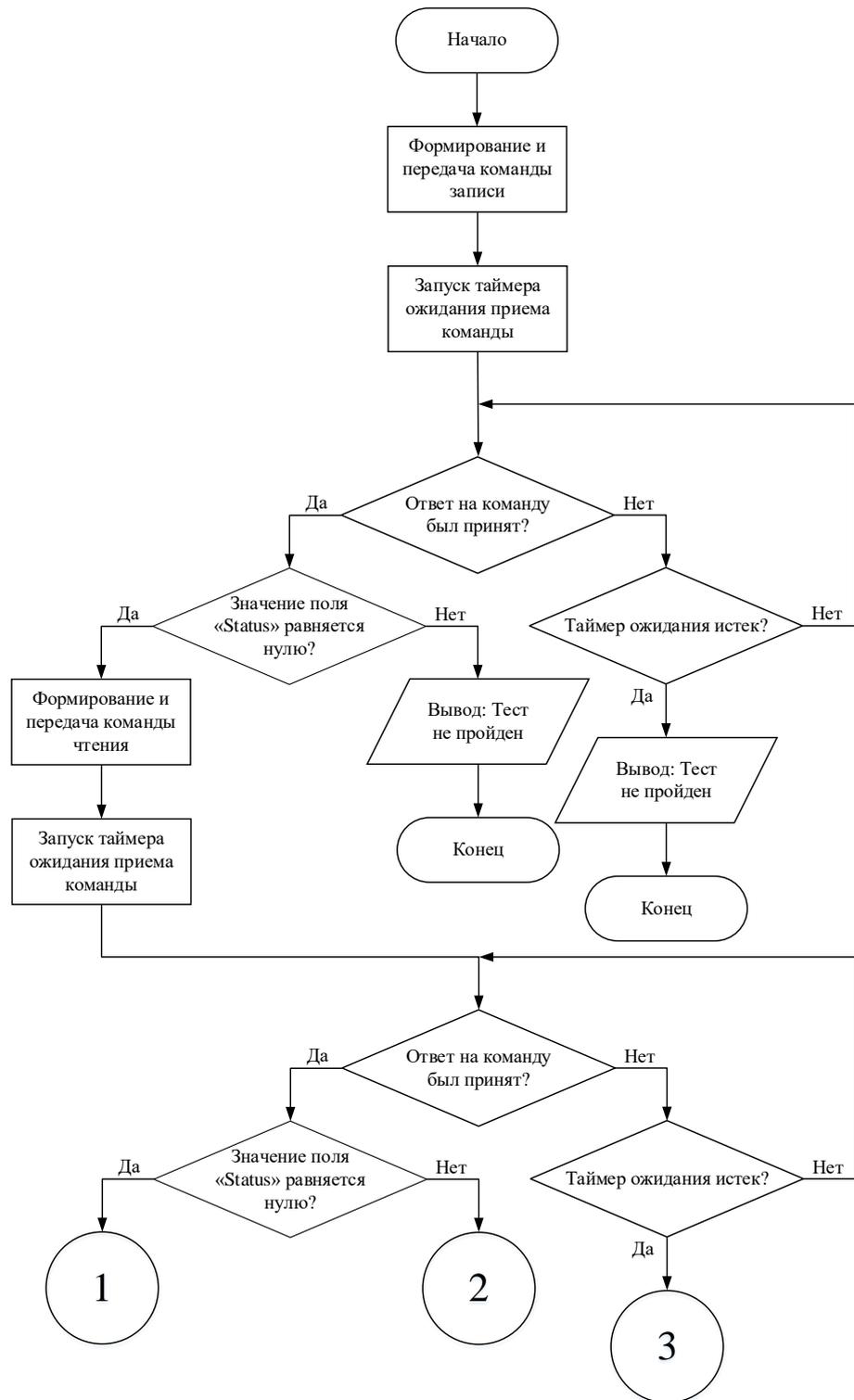
б) Алгоритм проверки корректности обработки команды записи (пункт 5.3).

Проверка состоит из двух следующих последовательностей действий:

- команда записи формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. С DSI передается команда записи. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, в котором в поле «Status» должно содержаться значение равное нулю. В случае если обозначенные условия выполняются, то осуществляется переход к следующей последовательности действий;

- команда чтения формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. С DSI передается команда чтения. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, в котором в поле «Status» должно содержаться значение равное нулю, а в поле «Data» должны содержаться значения, равные тем, что были переданы ранее в поле «Data» команды записи. В случае если обозначенные условия выполняются, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки корректности обработки команды записи представлена на рисунке 9.



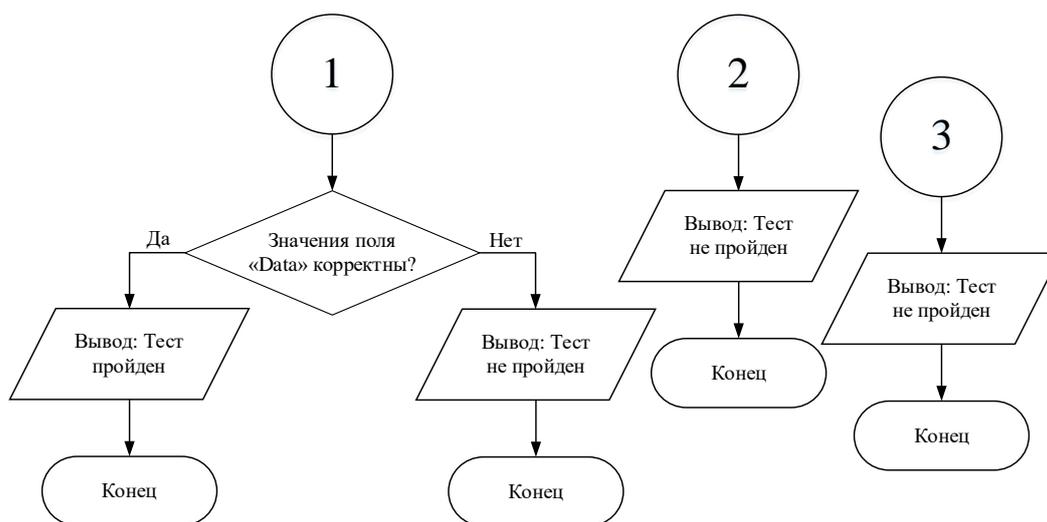


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма проверки корректности обработки команды записи

в) Алгоритм проверки корректности обработки команды чтения-изменения-записи (пункт 5.5).

Проверка состоит из трех следующих последовательностей действий:

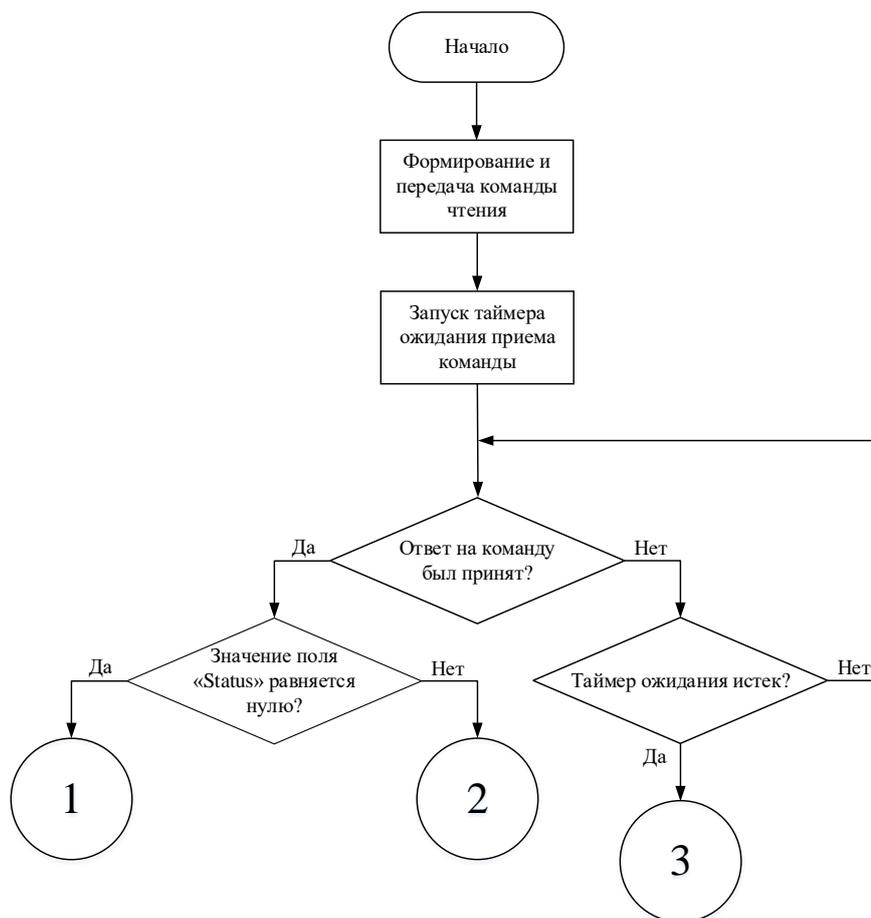
- команда чтения формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. С DSI передается команда чтения. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, в котором в поле «Status» должно содержаться значение равное нулю. В случае если обозначенные условия выполняются, то значения, полученные в поле «Data», фиксируются и осуществляется переход к следующей последовательности действий;

- команда чтения-изменения-записи формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. С DSI передается команда чтения-изменения-записи. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, в котором в поле «Status» должно содержаться значение равное нулю, а в поле «Data» должны содержаться значения, равные тем, что были ранее получены с командой чтения. В случае если обозначенные условия

выполняются, то осуществляется переход к следующей последовательности действий;

– команда чтения формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. С DSI передается команда чтения. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, в котором в поле «Status» должно содержаться значение равное нулю, а в поле «Data» должны содержаться значения, равные тем, что были переданы ранее в поле «Data» с учетом значений в поле «Mask» команды чтения-изменения-записи. В случае если обозначенные условия выполняются, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки корректности обработки команды чтения-изменения-записи представлена на рисунке 10.



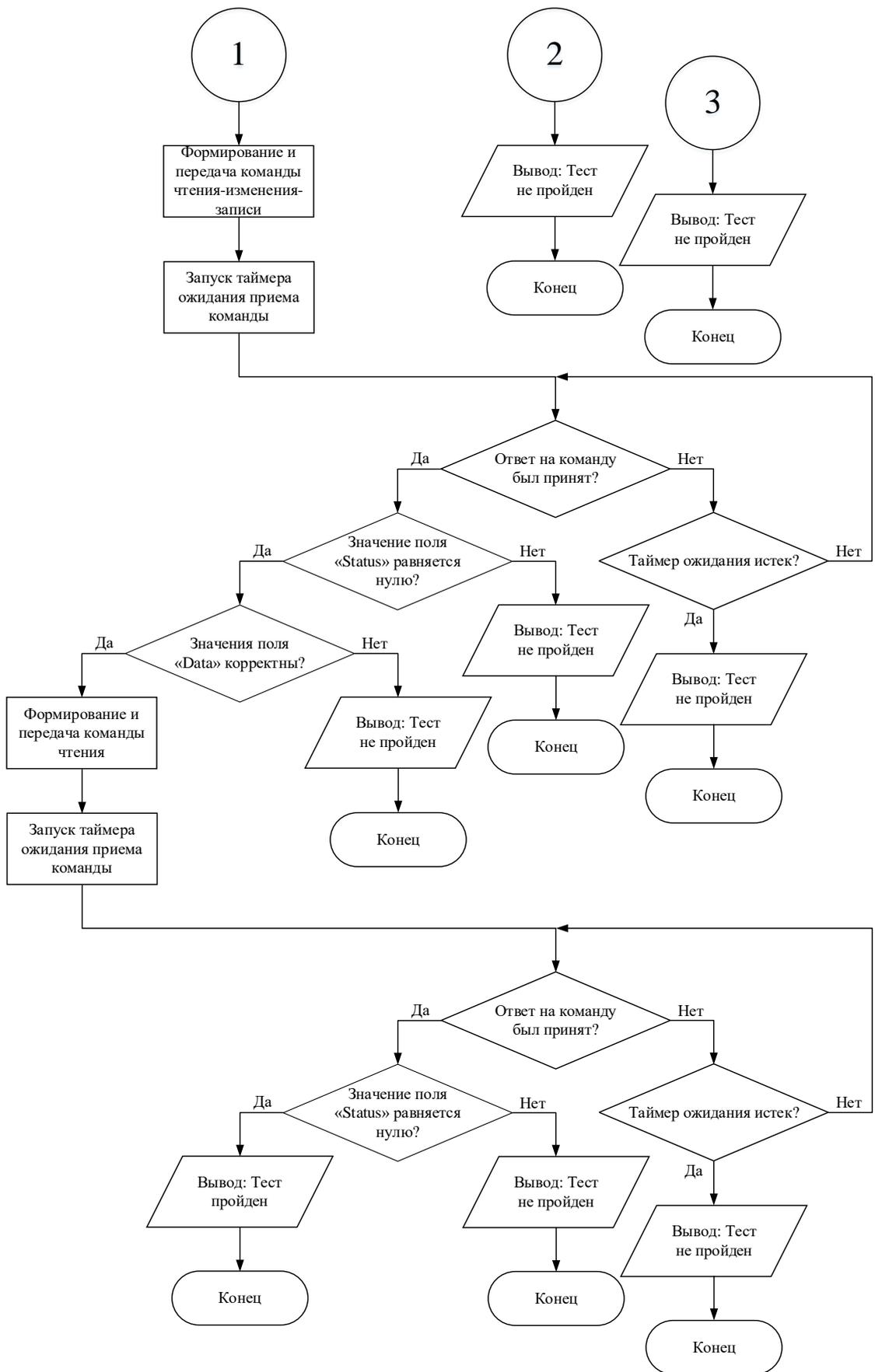


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма проверки корректности обработки команды чтения-изменения-записи

2) Проверка корректности обработки команд, содержащих ошибки (расширенная проверка).

Команда записи:

– неполный заголовок (не должен посылаться ответ) (пункт 5.3.3.4.2 стандарта);

– ошибочный конец пакета (не должен посылаться ответ) (пункт 5.3.3.4.3 стандарта);

– ошибка CRC заголовка (не должен посылаться ответ) (пункт 5.3.3.4.4 стандарта);

– неиспользуемый тип пакета (пункт 5.3.3.4.6 стандарта);

– неверный командный код (пункт 5.3.3.4.7 стандарта);

– неверный ключ (пункт 5.3.3.5.2 стандарта);

– неверный логический адрес (пункт 5.3.3.5.3 стандарта);

– превышение объема буфера (команда записи с требованием верификации) (пункт 5.3.3.6.3 стандарта);

– ошибка CRC данных (команда записи с требованием верификации) (пункт 5.3.3.6.5 стандарта);

– неожиданный конец пакета (команда записи с требованием верификации) (пункт 5.3.3.6.6 стандарта);

– превышение ожидаемого объема данных (команда записи с требованием верификации) (пункт 5.3.3.6.7 стандарта);

– ошибочный конец пакета (команда записи с требованием верификации) (пункт 5.3.3.4.8 стандарта);

– ошибка CRC данных (команда записи без требования верификации) (пункт 5.3.3.6.10 стандарта);

– неожиданный конец пакета (команда записи без требования верификации) (пункт 5.3.3.6.11 стандарта);

– превышение ожидаемого объема данных (команда записи без требования верификации) (пункт 5.3.3.6.12 стандарта);

– ошибочный конец пакета (команда записи без требования верификации) (пункт 5.3.3.4.13 стандарта).

Команда чтения:

– неполный заголовок (не должен посылаться ответ) (пункт 5.4.3.4.2 стандарта);

– ошибочный конец пакета (не должен посылаться ответ) (пункт 5.4.3.4.3 стандарта);

– ошибка CRC заголовка (не должен посылаться ответ) (пункт 5.4.3.4.4 стандарта);

– неиспользуемый тип пакета (пункт 5.4.3.4.6 стандарта);

– неверный командный код (пункт 5.4.3.4.7 стандарта);

– символы данных в команде чтения (пункт 5.4.3.4.8 стандарта);

– неверный ключ (пункт 5.4.3.5.2 стандарта);

– неверный логический адрес (пункт 5.4.3.5.3 стандарта).

Команда чтения-изменения-записи:

– неполный заголовок (не должен посылаться ответ) (пункт 5.5.3.4.2 стандарта);

– ошибочный конец пакета (не должен посылаться ответ) (пункт 5.5.3.4.3 стандарта);

– ошибка CRC заголовка (не должен посылаться ответ) (пункт 5.5.3.4.4 стандарта);

– неиспользуемый тип пакета (пункт 5.5.3.4.6 стандарта);

– неверный командный код (пункт 5.5.3.4.7 стандарта);

– RMW действие с данными (5.5.3.4.9);

– ошибка CRC данных (пункт 5.5.3.4.10 стандарта);

– неожиданный конец пакета (пункт 5.5.3.4.11 стандарта);

– превышение ожидаемого объема данных (пункт 5.5.3.4.12 стандарта);

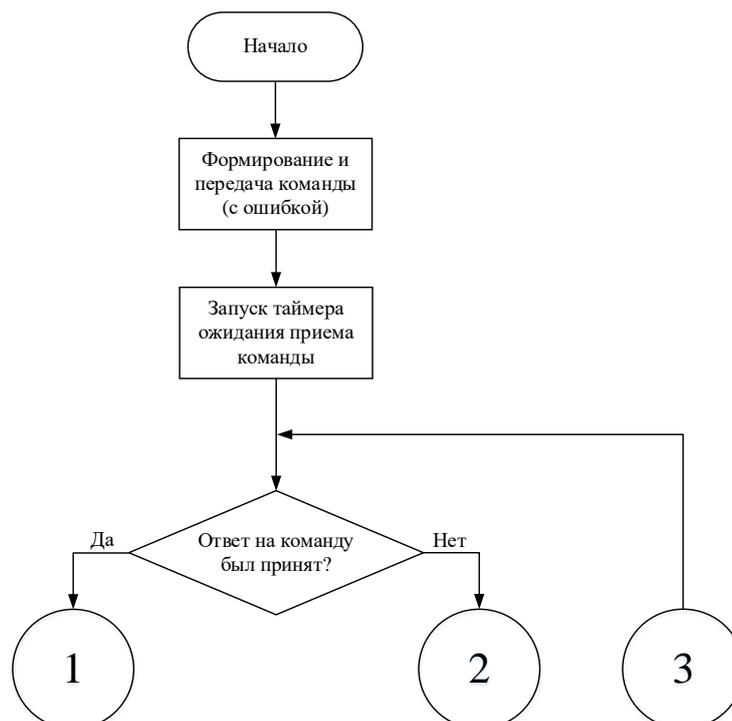
- ошибочный конец пакета (пункт 5.5.3.4.14 стандарта);
- неверный ключ (пункт 5.5.3.5.2 стандарта);
- неверный логический адрес (пункт 5.5.3.5.3 стандарта).

Данные проверки подразделяются на две части:

а) Алгоритм проверок корректности обработки команд, содержащих ошибки, на которые не следует посылать ответ.

Команда формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. Бит «Reply» поля «Instruction» в обязательном порядке задается равным единице. В структуру команды внедряется ошибка, корректность обработки которой проверяется. С DSI передается команда. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, который не должен быть принят. В случае если обозначенное условие выполняется, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверок корректности обработки команд, содержащих ошибки, на которые не следует посылать ответ, представлена на рисунке 11.



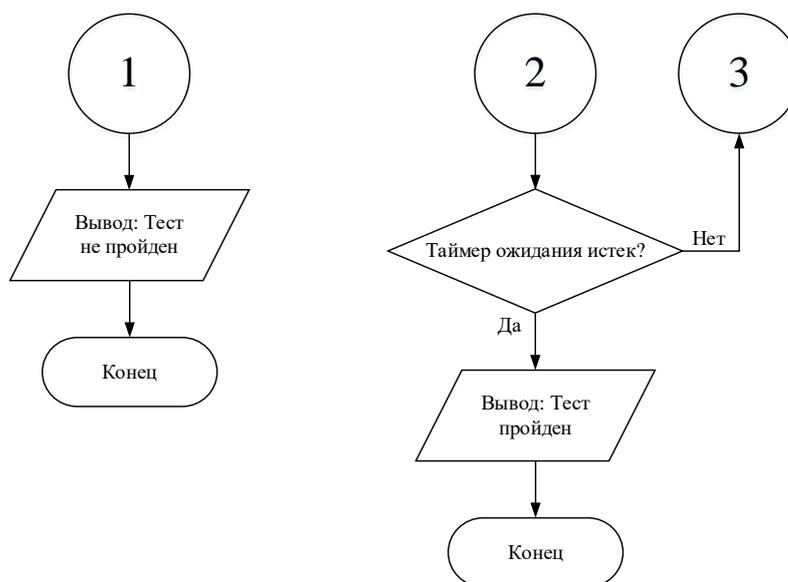


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма проверок корректности обработки команд, содержащих ошибки, на которые не следует посылать ответ

б) Алгоритм проверок корректности обработки команд, содержащих ошибки, на которые следует посылать ответ.

Команда формируется в соответствии с форматом, определенном в стандарте RMAP. Поля команды задаются с учетом особенностей тестируемого устройства. Бит «Reply» поля «Instruction» в обязательном порядке задается равным единице. В структуру команды внедряется ошибка, корректность обработки которой проверяется. С DSI передается команда. После этого запускается таймер ожидания приема ответа, в котором в поле «Status» должно содержаться значение, соответствующее ожидаемому коду ошибки. В случае если обозначенные условия выполняются, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверок корректности обработки команд, содержащих ошибки, на которые следует посылать ответ, представлена на рисунке 12.

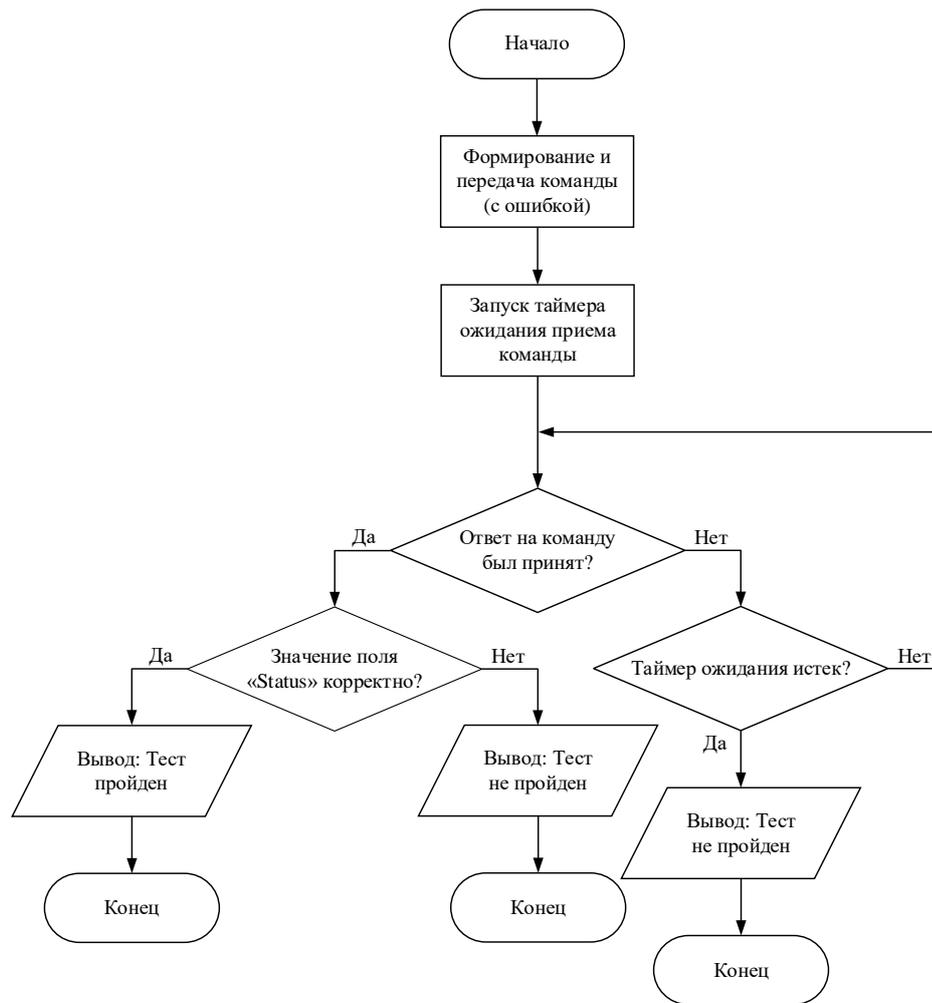


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма проверок корректности обработки команд, содержащих ошибки, на которые следует посылать ответ

Приложение В

Алгоритмы проверок конечных узлов на соответствие требованиям спецификации СТП-ИСС

Для проведения тестов, обозначенных в разделе «Автономное тестирование элементов систем на базе SpaceWire» третьей главы диссертационного исследования, применяются аппаратно-программные средства, обозначенные в таблице 3.

Таблица 3 – Аппаратно-программные средства для тестирования конечных устройств на соответствие требованиям спецификации СТП-ИСС

| Номер | Аппаратно-программные средства | Назначение |
|-------|--|---|
| 1 | Персональный компьютер | Управление процессом тестирования |
| 2 | Специальное программное обеспечение | Формирование тестовых последовательностей |
| 3 | DSI | Отправка тестовых последовательностей |
| 4 | Устройство, с реализованным блоком СТП-ИСС | Тестируемый элемент системы |

Устройство с реализованным блоком СТП-ИСС подключается к DSI с помощью одного кабеля SpaceWire. Структурная схема для проведения тестирования устройства с реализованным блоком СТП-ИСС представлена на рисунке 13.

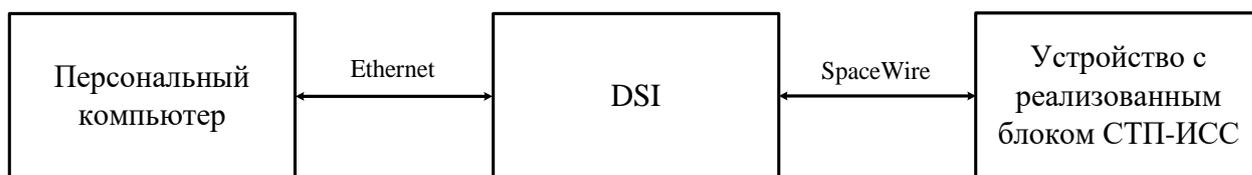


Рисунок 13 – Структурная схема для проведения тестирования устройства с реализованным блоком СТП-ИСС

Для проведения проверок тестируемое устройство конфигурируется путем задания значений параметров СТП-ИСС – таймера времени жизни и таймера повтора. Таймер времени жизни задается кратным таймеру повтора,

благодаря чему допускается представление данного параметра в виде максимального количества повторных отправок.

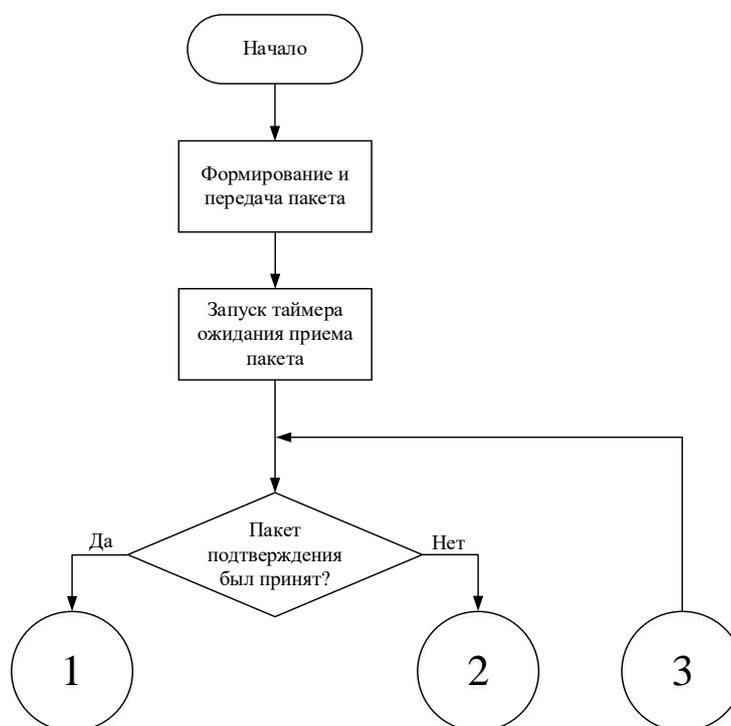
1) Проверка работы механизма гарантированной доставки (приемник).

Данная проверка подразделяется на две части:

а) Алгоритм проверки формирования и передачи пакета подтверждения.

Пакет формируется в соответствии с форматом, определенном в спецификации СТП-ИСС (с учетом особенностей тестируемого устройства). Бит «Требование подтверждения приема» поля «Флаги (MSB)» в обязательном порядке задается равным единице. С DSI передается пакет СТП-ИСС. После этого запускается таймер ожидания приема пакета подтверждения. В случае если пакет подтверждения принят до истечения таймера, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки формирования и передачи пакета подтверждения представлена на рисунке 14.



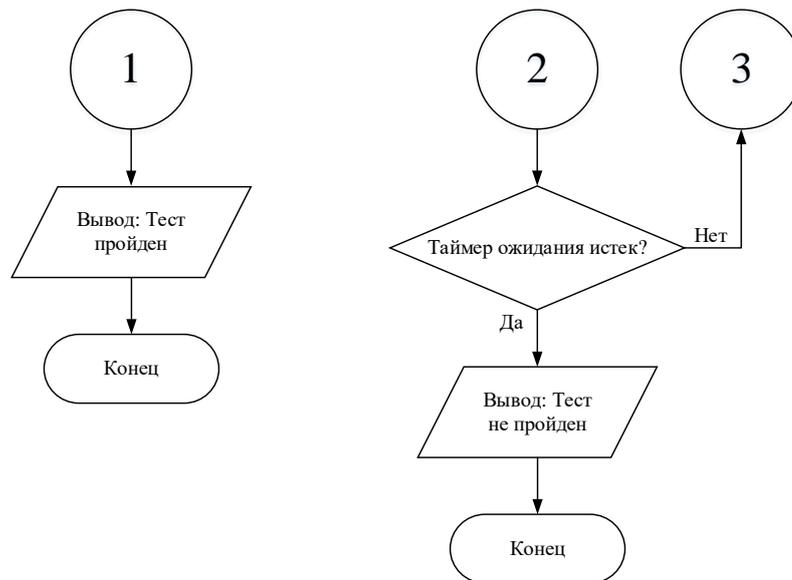


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма проверки формирования и передачи пакета подтверждения

б) Алгоритм проверки отсутствия формирования и передачи пакета подтверждения.

Пакет формируется в соответствии с форматом, определенном в спецификации СТП-ИСС (с учетом особенностей тестируемого устройства). В процессе формирования пакета задается одно из условий, при котором тестируемое устройство не должно формировать и передавать пакет подтверждения:

- некорректное значение поля «CRC»;
- некорректное значение поля «Длина поля данных»;
- нулевое значение бита «Требование подтверждения приема» поля «Флаги (MSB)».

С DSI передается пакет СТП-ИСС. После этого запускается таймер ожидания приема пакета подтверждения. В случае если таймер истек, а пакет подтверждения не принят, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки отсутствия формирования и передачи пакета подтверждения представлена на рисунке 15.

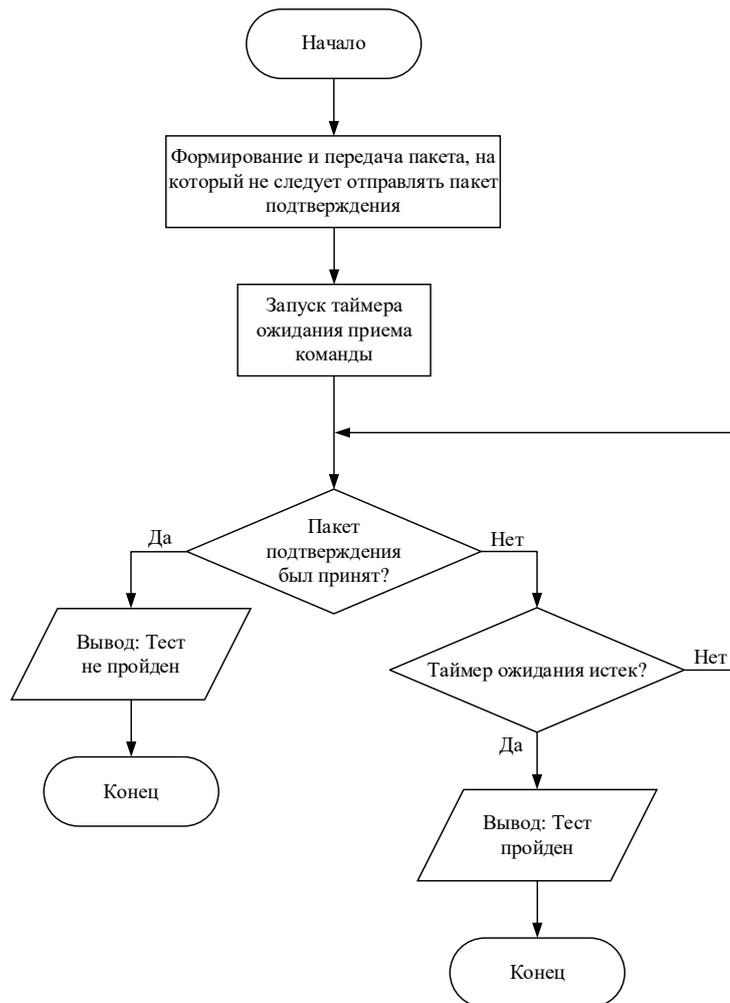


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма проверок отсутствия формирования и передачи пакета подтверждения

2) Проверка работы механизма гарантированной доставки данных (передатчик).

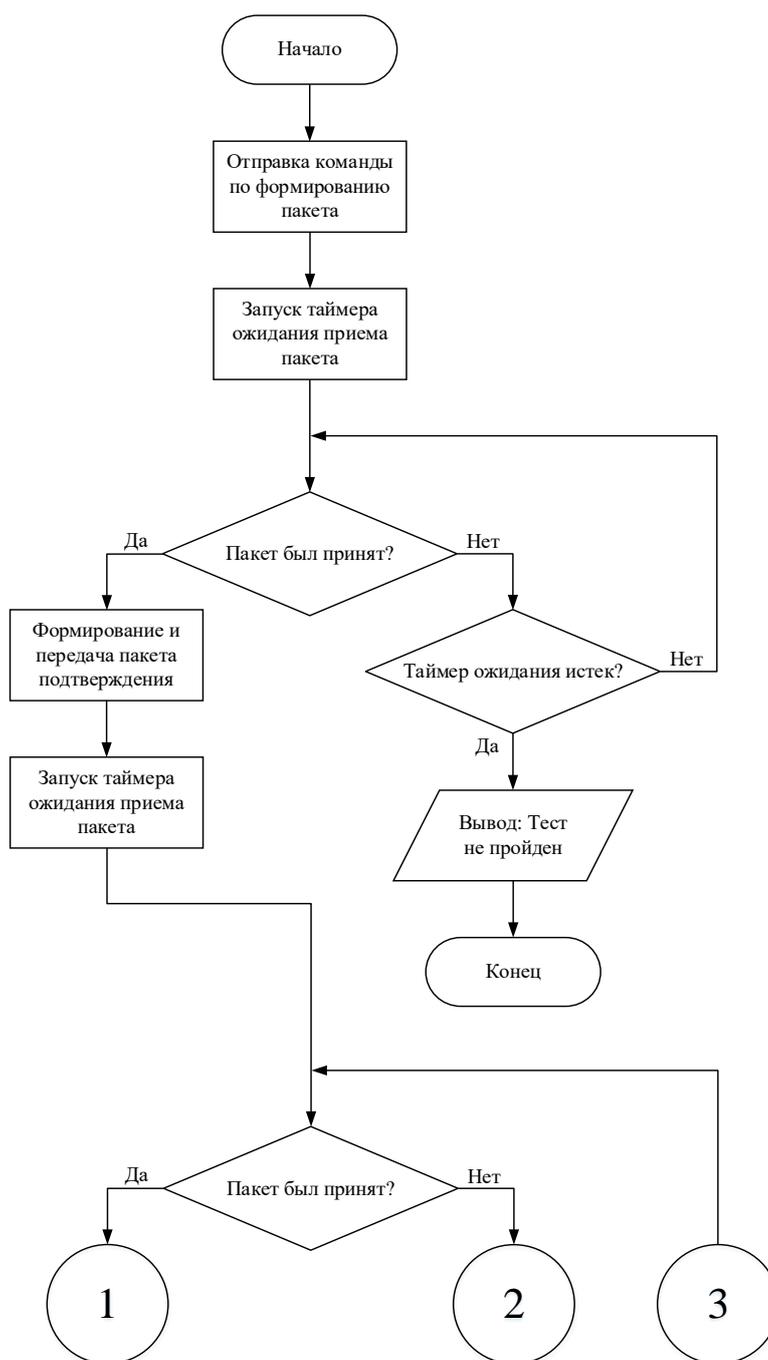
Данная проверка подразделяется на две части:

а) Алгоритм проверки приема и обработки пакета подтверждения.

На тестируемое устройство подается команда по формированию и передаче пакета СТП-ИСС с требованием подтверждения приема. После этого запускается таймер ожидания приема пакета. Если пакет был принят, DSI на его основе формирует и передает пакет подтверждения. После этого запускается таймер ожидания приема еще одного пакета СТП-ИСС (значение

таймера задается больше по отношению к заданному для тестируемого устройства параметру конфигурации «Таймер повтора» тестируемого устройства). В случае если пакет СТП-ИСС не принят (не должен передаваться), тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки приема и обработки пакета подтверждения представлена на рисунке 16.



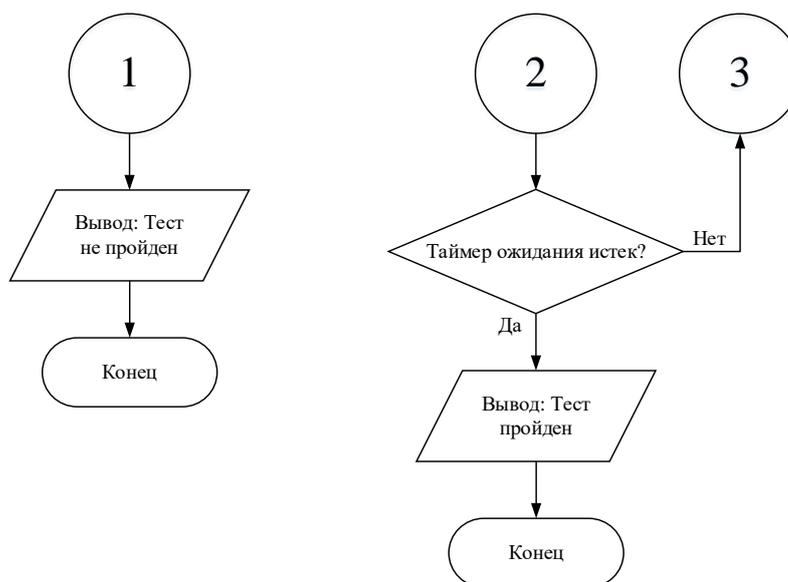


Рисунок 16 – Блок-схема алгоритма проверки приема и обработки пакета подтверждения

б) Алгоритм проверки повторной передачи пакета СТП-ИСС.

На тестируемое устройство подается команда по формированию и передаче пакета СТП-ИСС с требованием подтверждения приема. После этого запускается таймер ожидания приема пакета. Если пакет был принят, инкрементируется счетчик передач пакетов СТП-ИСС (DSI не формирует и не передает пакет подтверждения). После этого осуществляется переход к шагу с запуском таймера ожидания приема еще одного пакета (значение таймера задается больше по отношению к заданному для тестируемого устройства параметру конфигурации «Таймер повтора» тестируемого устройства). Тестируемое устройство должно снова передать исходный пакет по истечении таймера повтора, после чего описанная последовательность действий повторяется, что продолжается до истечения таймера времени жизни. В случае если взводимый таймер ожидания приема истек при значении счетчика передач пакетов, соответствующему прогнозируемому максимальному количеству передач пакета, тест считается пройденным успешно.

Блок-схема алгоритма проверки повторной передачи пакета СТП-ИСС представлена на рисунке 17.

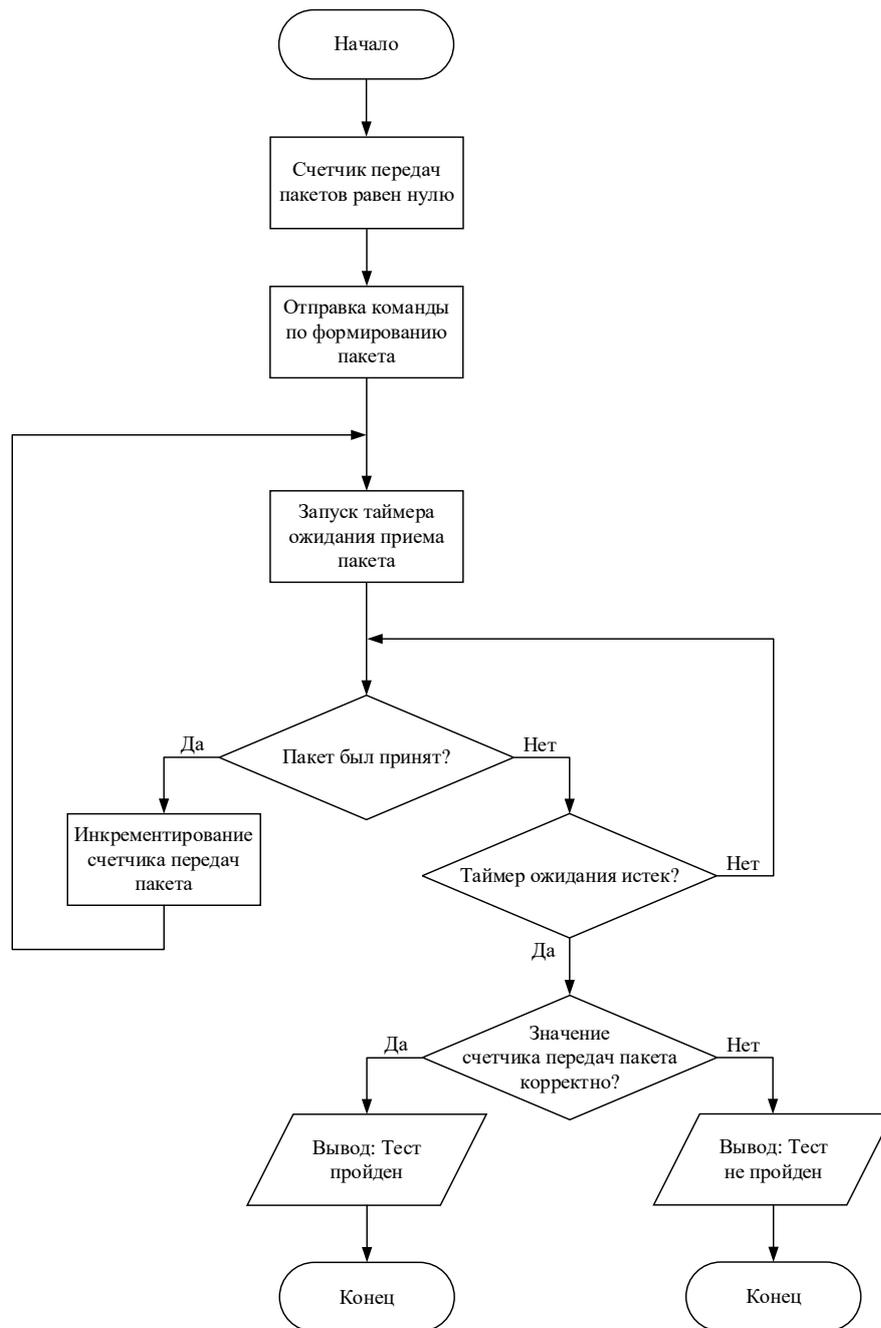


Рисунок 17 – Блок-схема алгоритма проверки повторной передачи пакета СТП-ИСС

Приложение Г

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора по
электрическому проектированию и системам
управления космическими аппаратами
АО «РЕШЕТНЁВ»



С.Г. Кочура

2024 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Максютина Андрея Сергеевича «Моделирование работы бортовых информационных сетей SpaceWire при создании перспективных автоматических космических аппаратов»

Настоящий акт подтверждает, что следующие результаты диссертационной работы «Моделирование работы бортовых информационных сетей SpaceWire при создании перспективных автоматических космических аппаратов» Максютина А.С. использовались специалистами АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» при разработке рекомендаций по базовым алгоритмам тестирования сетей SpaceWire и их отдельных элементов в рамках выполнения СЧ НИР «Разработка предложений по применению новых редакций международных стандартов SpaceWire/SpaceFibre и современных беспроводных интерфейсов при создании перспективных автоматических космических аппаратов», шифр: СЧ НИР "Партитура-4" – "Интерфейсы-ИСС", контракт от 14.03.24 № 2125730201422217000241851/(12-10000-2022)-10401/57-2024 между АО «ЦНИИмаш» и АО «РЕШЕТНЁВ»:

1. Алгоритмы для определения и исследования характеристик информационных потоков оконечных узлов SpaceWire.
2. Алгоритмы для тестирования оконечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов SpaceWire на соответствие требованиям стандарта ГОСТ Р 70020-2022 и ECSS-E-ST-50-52C.

Применение указанных выше результатов диссертационной работы позволяет повысить качество проектирования бортовых информационных сетей SpaceWire; повысить качество тестирования оконечных узлов и маршрутизирующих коммутаторов SpaceWire.

Научный руководитель СЧ НИР,
Начальник отдела системного
проектирования сложной
функциональной электронной
компонентной базы, бортовой
аппаратуры и систем
космических аппаратов
АО «РЕШЕТНЁВ»

Д.В. Дымов



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности
«СибГУ им. М.Ф. Решетнева»

А.А. Лукьянова

«___» _____ 2024 г.

АКТ

**о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Максютина Андрея Сергеевича
«Моделирование работы бортовых информационных сетей SpaceWire при создании
перспективных автоматических космических аппаратов»**

Настоящий акт подтверждает, что следующие результаты диссертационной работы «Моделирование работы бортовых информационных сетей SpaceWire при создании перспективных автоматических космических аппаратов» Максютина А.С. использовались в процессе разработки дисциплины «Технологии информационного взаимодействия радиоэлектронных систем» для передовой программы инженерного образования «Программно-конфигурируемые радиосистемы» Института передовых производственных технологий СибГУ им М.Ф. Решетнева:

1. Алгоритмы моделирования работы бортовых информационных сетей, построенных на основе технологии SpaceWire.
2. Алгоритмы для определения и исследования характеристик информационных потоков оконечных узлов SpaceWire.

Применение указанных выше результатов диссертационной работы позволяет повысить качество подготовки студентов, обучающихся по обозначенной программе, путем формирования у них знаний и компетенций в области построения бортовых информационных сетей космических аппаратов, что повышает их востребованность как специалистов для предприятий ракетно-космической отрасли.

Руководитель передовой
программы инженерного
образования, кандидат
технических наук, доцент
Кафедры электронной техники и
телекоммуникаций
«СибГУ им. М.Ф. Решетнева»

К.Э. Гаипов