

*На правах рукописи*



**Максютин Андрей Сергеевич**

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

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Мурыгин Александр Владимирович**

Официальные оппоненты: **Канаев Андрей Константинович**,  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», факультет «Автоматизация и интеллектуальные технологии», профессор кафедры «Электрическая связь»

**Никишин Кирилл Игоревич**,  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доцент кафедры «Вычислительная техника»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится «24» апреля 2026 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты Красноярский рабочий, 31, зал заседаний диссертационного совета, ауд. П207.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» и на сайте: <https://www.sibsau.ru>.

Автореферат разослан «12» марта 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Панфилов Илья Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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, являющиеся основой для построения подобных систем. На сегодняшний день в отечественной космической отрасли происходит постепенное внедрение одной из таких технологий – SpaceWire. Данный процесс обуславливается ростом интенсивности информационного взаимодействия, из-за которого предшествующая SpaceWire технология мультиплексного канала информационного обмена (МКИО) уже не позволяет отвечать всем требованиям, предъявляемым к передаче данных бортовой аппаратуры перспективных автоматических отечественных КА.

В мировой практике создание распределенных бортовых систем на базе SpaceWire неразрывно связано с применением средств моделирования, представляющего собой важный инструмент на ранних этапах разработки, так как с его помощью обеспечивается возможность старта данного процесса до непосредственного изготовления элементов системы – бортовой аппаратуры КА. Принимая во внимание зарубежный опыт, на сегодняшний день целесообразной является разработка комплекса моделирования, который позволял бы в процессе построения моделей учитывать особенности информационного взаимодействия систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА. Кроме того, в условиях начального этапа интеграции SpaceWire в отечественной космической отрасли также важно, чтобы обозначенный комплекс моделирования позволял проводить исследования систем на базе SpaceWire, наиболее распространенным направлением среди которых является поиск зависимостей характеристик информационных потоков от различных факторов.

**Степень разработанности темы.** Среди зарубежных организаций, внесших наиболее значимый вклад в разработку технических решений, обеспечивающих моделирование работы распределенных бортовых 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 распределенных бортовых 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 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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы и описана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, выделена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведена общая информация о технологии SpaceWire. Обозначена проблема, связанная с обеспечением решения задач, стоящих в процессе создания

распределенных бортовых систем на базе SpaceWire, в условиях постепенного внедрения данной технологии в отечественной космической отрасли. Алгоритм процесса создания системы на базе SpaceWire, представлен в виде блок-схемы на рисунке 1.

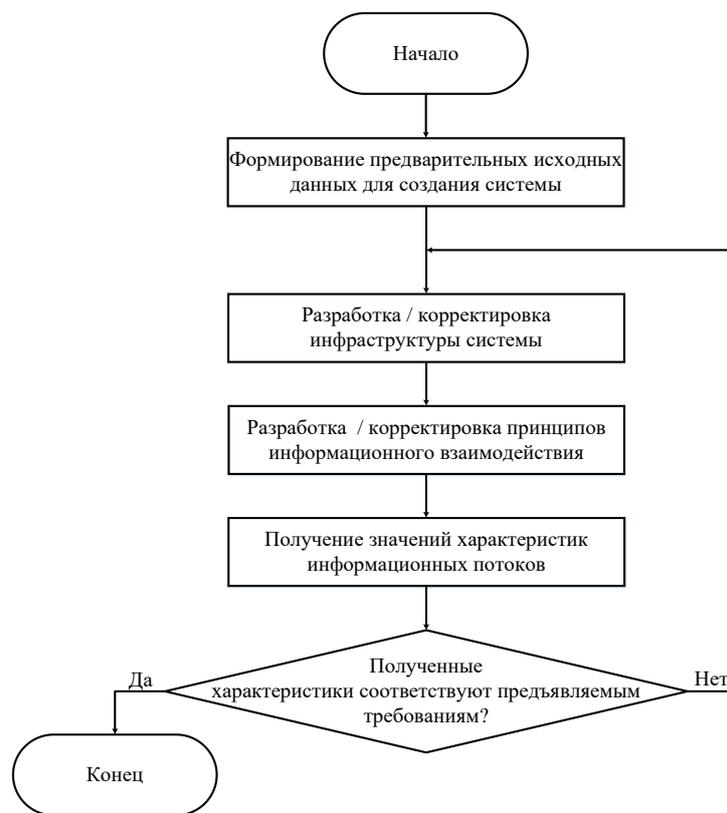


Рисунок 1 – Алгоритм процесса создания системы на базе SpaceWire

Кроме того, отмечается допущение возможности проведения исследовательских работ на ранних этапах создания систем, что способствует их дальнейшему развитию. Типовым направлением исследований является определение зависимостей характеристик информационных потоков от различных факторов.

В сложившейся мировой практике широко применяемым методом для решения задач, стоящих в процессе создания систем на базе SpaceWire, является моделирование. В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire в отечественной космической отрасли необходимым является наличие комплекса моделирования работы систем на базе SpaceWire, который обеспечивал бы предоставление возможности воспроизведения особенностей информационного взаимодействия бортовой аппаратуры перспективных автоматических отечественных КА. Требования к обозначенному комплексу определяются исходя из анализа информации о типовом объекте моделирования, в качестве которого рассматривается система на базе SpaceWire из состава одного из перспективных автоматических отечественных КА, структура которой представлена на рисунке 2.

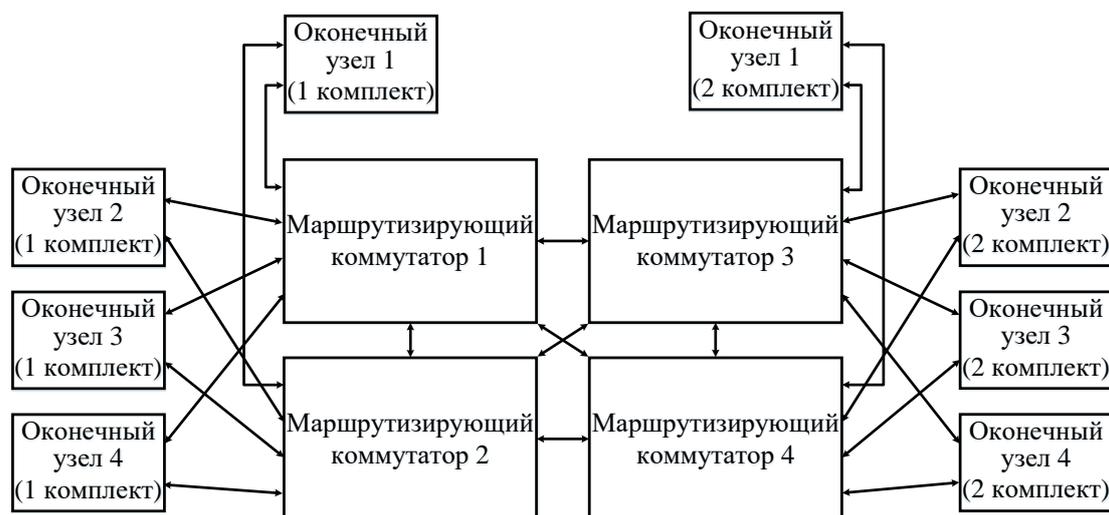


Рисунок 2 – Структура системы на базе SpaceWire из состава одного перспективных автоматических отечественных КА

Передача данных в системе осуществляется в соответствии со специально разработанными протоколами информационного взаимодействия. Для каждого протокола разработаны режимы, в которых функционируют определенные информационные потоки. В качестве примера в таблице 1 рассматриваются информационные потоки, функционирующие в одном из режимов.

Таблица 1 – Информационные потоки, функционирующие в одном из режимов протокола информационного взаимодействия

№	Назначение	Объем передаваемых данных, байт	Условие передачи данных	Тип команды
Оконечный узел 1 → Оконечный узел 2				
1	Информационный поток 1	100	По запросу	Чтение
2	Информационный поток 2	500	По запросу	
3	Информационный поток 3	1000	По запросу	
4	Информационный поток 4	300	По запросу	

Часть из представленных информационных потоков обладают взаимосвязью. Передача данных из состава информационного потока 3 следует без задержек за передачей данных из состава информационного потока 2 (независимо от наличия ошибок), после чего спустя 20 мс следует передача данных из состава информационного потока 1 (при отсутствии ошибок). Если при передаче данных какого-либо из информационных потоков происходит ошибка, то процесс информационного взаимодействия повторяется спустя 40 мс (до трех повторов).

Определяются задачи, ставящиеся перед комплексом моделирования:

1. Определение значений характеристик информационных потоков. Среди характеристик в качестве ключевых выделяются: задержка передачи данных, скорость передачи данных, вероятность доставки данных без искажений. Дополнительно выделяются аналогичные характеристики, связанные с применением транспортных протоколов RMAP и СТП-ИСС, для которых предусмотрена передача ответов / пакетов подтверждения.

2. Исследование зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов. Исследуемые характеристики соответствуют обозначенным выше.

Для определения конфигурационных параметров комплекса моделирования проводится декомпозиция объекта моделирования на основании полученной информации о системе на базе SpaceWire из состава одного из отечественных КА. Кроме того, учитывается

возможность развития объекта в части применения новых технических решений. Результаты декомпозиции представлены на рисунке 3.

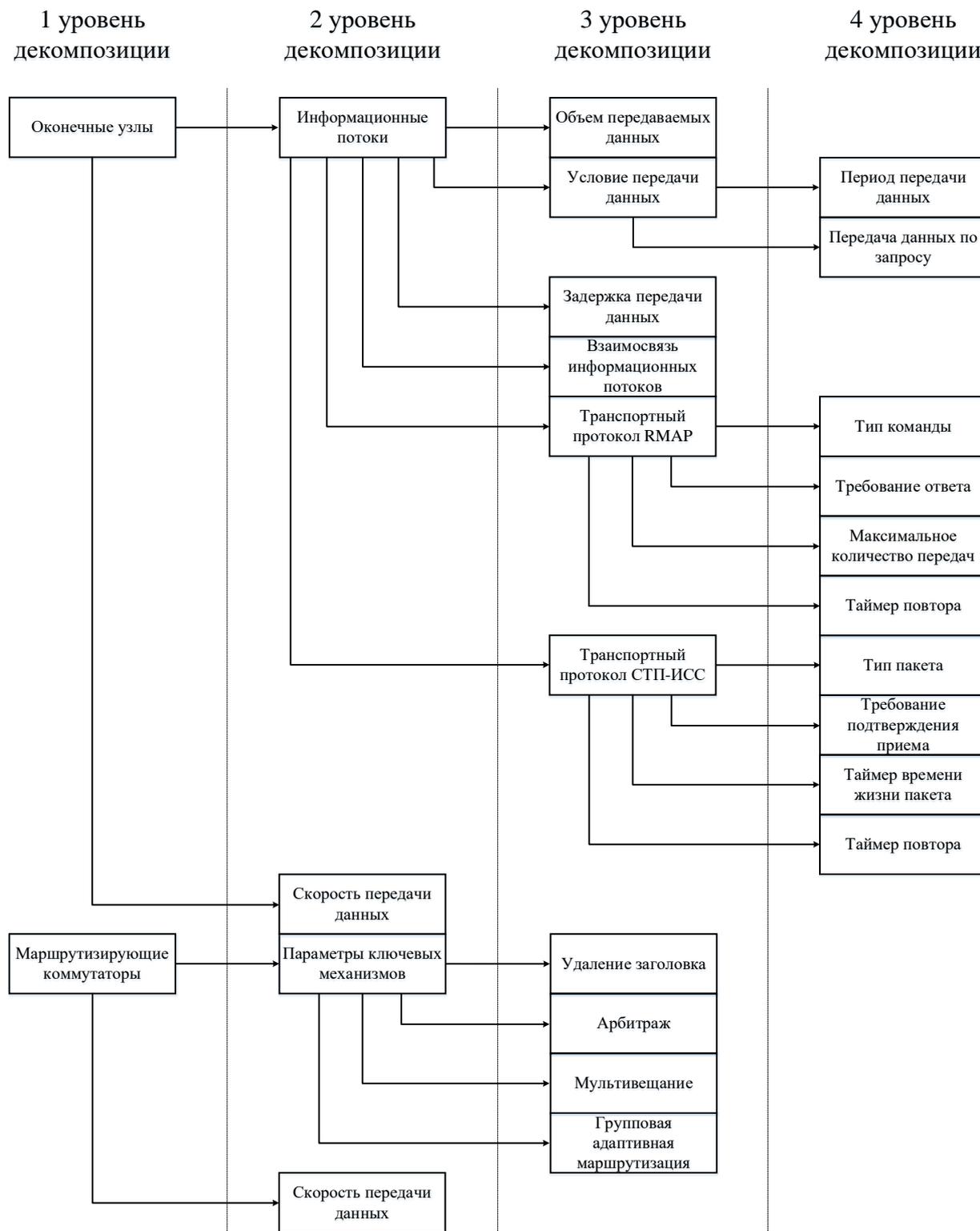


Рисунок 3 – Декомпозиция объекта моделирования

Кроме того, отмечается, что комплекс моделирования должен обеспечивать возможность задания конфигурационных параметров для воспроизведения условий функционирования систем на базе SpaceWire в отношении искажений передаваемых данных (имитация влияния внешних факторов на объект моделирования).

Таким образом, в рамках главы рассмотрен процесс создания систем на базе SpaceWire, в ходе которого ставятся задачи, типовым средством для решения которых является моделирование. В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire в отечественной космической отрасли существует необходимость наличия соответствующего комплекса моделирования, для которого был сформулирован ряд требований.

Во второй главе рассматриваются существующие комплексы моделирования работы распределенных бортовых систем на базе SpaceWire. Сложилось два подхода к моделированию в зависимости от способа представления объекта моделирования: имитационное и аппаратно-программное. Структуры моделей систем на базе SpaceWire, построенные с помощью средств имитационного и аппаратно-программного моделирования представлены на рисунках 4, 5.



Рисунок 4 – Структура модели системы на базе SpaceWire, построенной с помощью средств имитационного моделирования

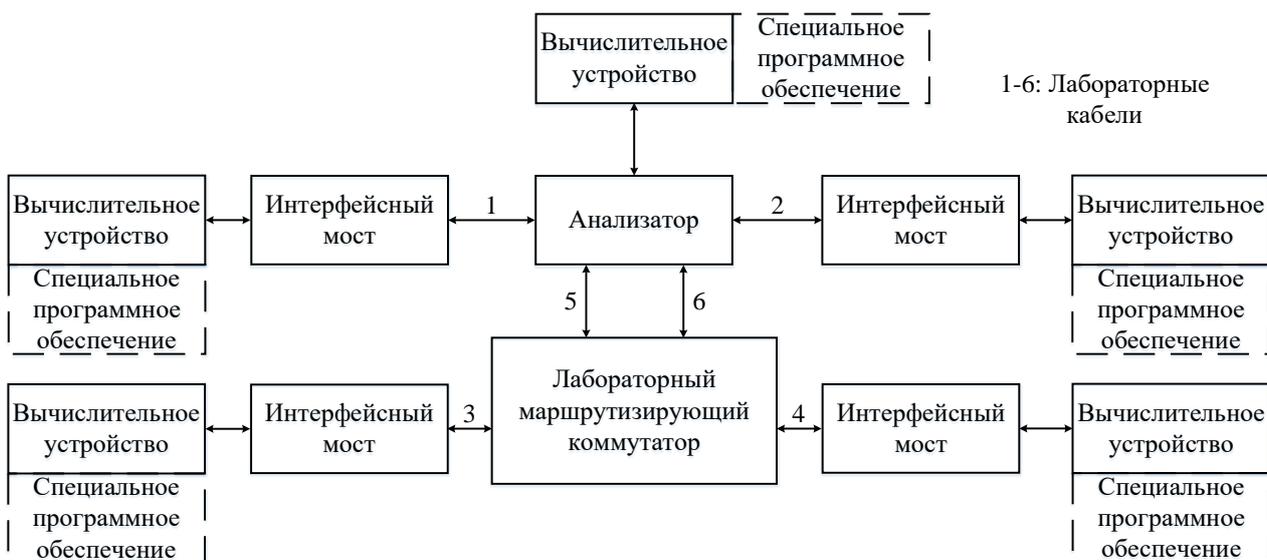


Рисунок 5 – Структура модели системы на базе SpaceWire, построенной с помощью средств аппаратно-программного моделирования

Для предметной области моделирования работы систем на базе SpaceWire выделяются технические решения, обладающие наиболее широким спектром функциональных характеристик: Modeling of SpaceWire Traffic (MOST), Simulator for High-speed Networks (SHINe), SpaceWire Automated NetWork Design and Simulation (SANDS), SpaceWire Interface Simulator (SWIS), iSAFT Protocol Testing and Validation System (iSAFT-PVS). В процессе анализа возможности применения выделенных комплексов моделирования выявлено, что ни один из них не отвечает сформулированным в первой главе требованиям в полном объеме. Отсутствует возможность решения задачи по исследованию зависимости характеристик

информационных потоков от различных факторов. Кроме того, не обеспечивается задание всех необходимых конфигурационных параметров, что отражает таблица 2.

Таблица 2 – Анализ возможности применения выделенных комплексов моделирования для обеспечения задания необходимых конфигурационных параметров

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	+	+	–	–	–

В качестве еще одного недостатка выделяется способ внедрения искажений в передаваемые данные. MOST и iSAFT-PVS позволяют организовывать моделирование сбойных ситуаций, регламентированных стандартом SpaceWire. SANDS и SWIS позволяют задавать параметр коэффициента битовых ошибок. Данные возможности не позволяют в полной мере обеспечивать воспроизведение условий функционирования распределенных бортовых систем КА в отношении искажений передаваемых данных.

Таким образом, в рамках главы проведен обзор существующих технических решений в области моделирования работы систем на базе SpaceWire. Анализ разработок показал, что ни одна из них не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к комплексу моделирования, который учитывал бы особенности информационного взаимодействия бортовой аппаратуры отечественных КА. Определена задача по проведению исследований, направленных на проектирование и разработку нового комплекса моделирования, отвечающего всем поставленным требованиям.

**В третьей главе** представлены исследования, посвященные проектированию и разработке комплекса моделирования работы распределенных бортовых систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА. Глава подразделяется на три основные части.

*В первой части* представлено исследование, связанное с проектированием структуры комплекса моделирования, являющейся основой для последующей разработки алгоритмов его функционирования. В качестве способа представления объекта моделирования выбрано аппаратно-программное моделирование, поскольку в таком случае обеспечивается полное

соответствие ряда процессов функционирования модели и объекта моделирования. Подбор специализированного оборудования проводится с применением матриц принятия решений (выбор критериев, и установка веса для них осуществляется на основании экспертных оценок). Среди подобранных образцов выделяются:

1. Интерфейсные мосты – Diagnostic SpaceWire Interface (4Links).
2. Маршрутизирующие коммутаторы – СБИС 1931КХ014 (АО «РЕШЕТНЁВ»).
3. Анализаторы – Multi-Link SpaceWire Recorder (4Links).

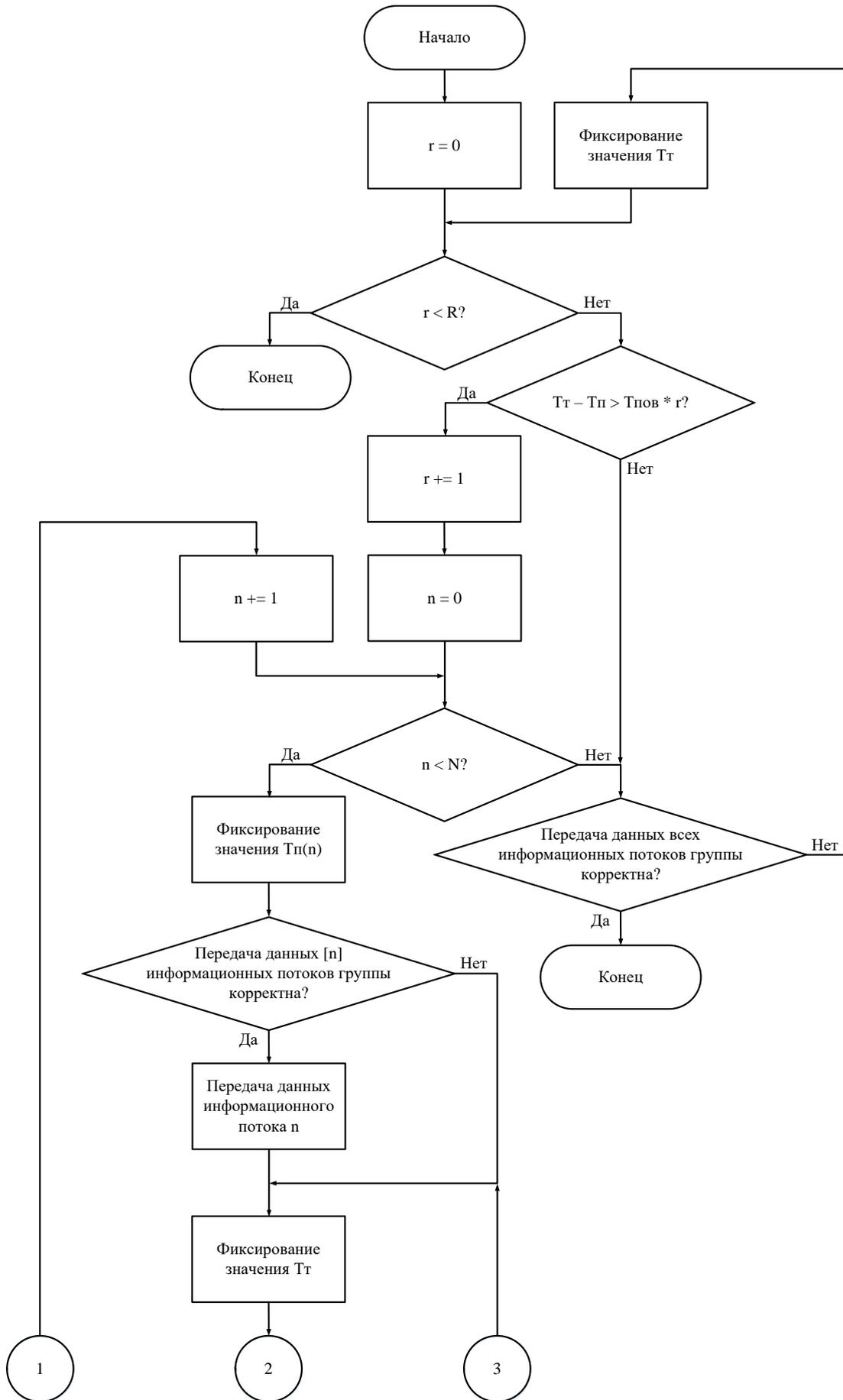
Итоговая структура комплекса моделирования, состоящего из блоков, каждый из которых предназначен для решения определенных задач, представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 – Структура комплекса моделирования

Во второй части представлено исследование, связанное с разработкой алгоритмов функционирования комплекса моделирования. В процессе разработки алгоритмов используются существующие знания и методы, а также опыт аналогичных разработок. Вместе с этим, разрабатываемые алгоритмы направлены на решение задачи по обработке информации о работе систем на базе SpaceWire отечественных КА для обеспечения необходимого 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.

Основное внимание уделено алгоритму работы конечных узлов, подразделяющемуся на алгоритмы передатчика и приемника. В свою очередь, внутри алгоритма работы передатчика выделяется алгоритм передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков, блок-схема которого представлена на рисунке 7.



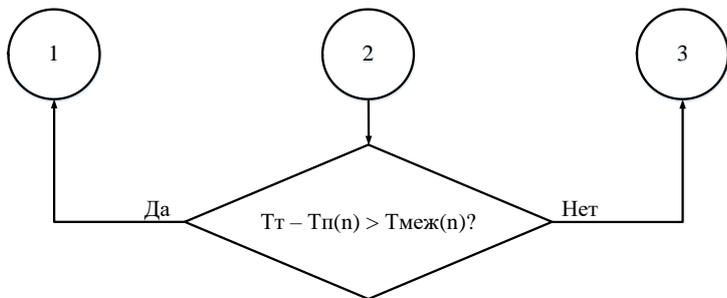


Рисунок 7 – Алгоритм передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков:  $T_t$  – текущее время;  $T_p$  – время передачи данных;  $N$  – общее число информационных потоков группы;  $n$  – текущий номер информационного потока группы;  $T_{p(n)}$  – время передачи данных из состава информационного 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

Представлен алгоритм оценки искажений в передаваемых данных. Возникновение искажений обуславливается влиянием факторов, из которых наиболее значимыми являются заряженные частицы космического пространства. Частоты возникновения искажений определяются по методикам расчета радиационных условий и измеряются в бит/с. Данные частоты определяются для каждого элемента системы на базе SpaceWire, стоящего на маршруте следования данных, т.к. они обладают разной устойчивостью к влиянию заряженных частиц. Типовой маршрут следования данных представлен на рисунке 8.

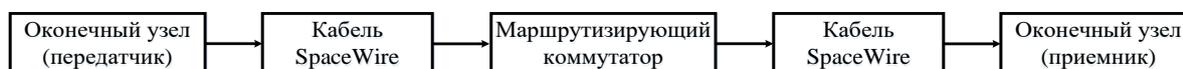
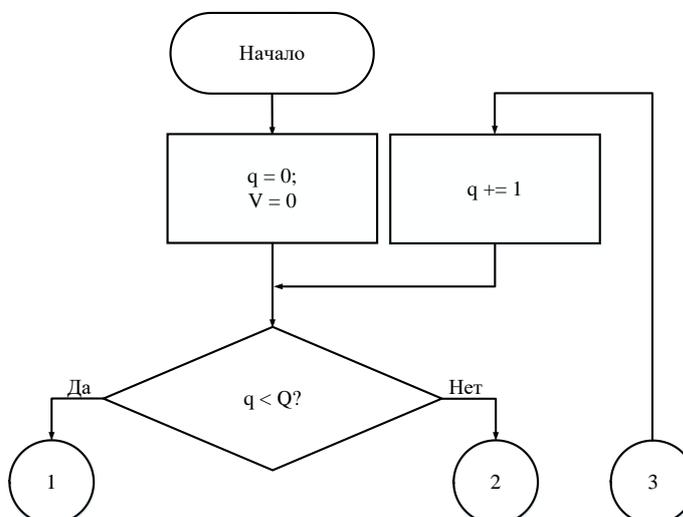


Рисунок 8 – Типовой маршрут следования данных

Комплекс моделирования реализует алгоритм, определяющий математическое ожидание номера искажаемого бита передаваемых данных из состава информационного потока ( $\mu$ ). Учитывается влияние каждого типа заряженной частицы (если им нельзя пренебречь). Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 9.



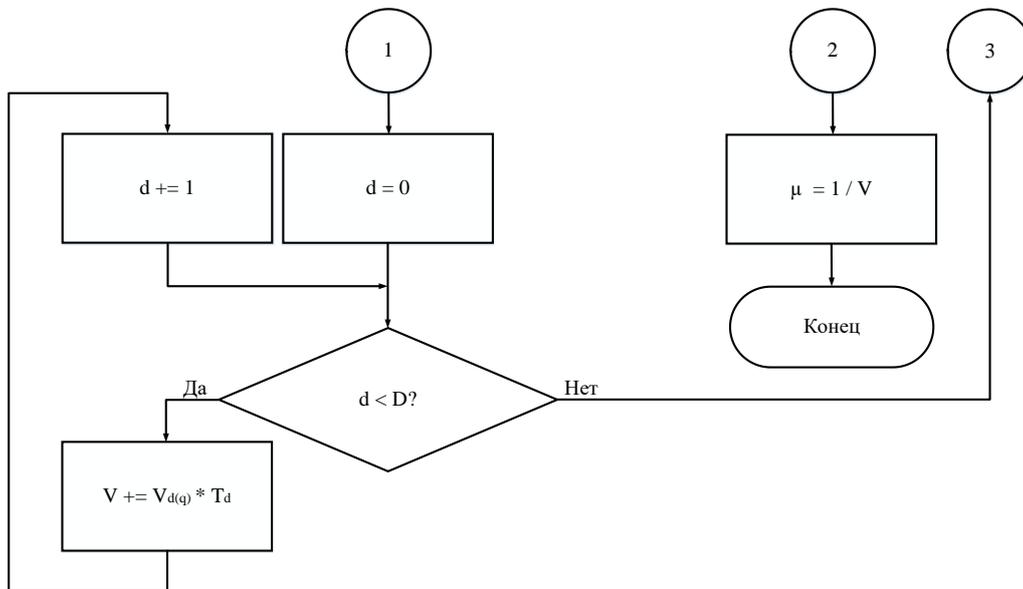


Рисунок 9 – Алгоритм расчета  $\mu$ :  $Q$  – общее число типов заряженных частиц;  $q$  – текущий порядковый номер типа заряженной частицы;  $D$  – общее число элементов, стоящих на маршруте следования данных;  $d$  – текущий порядковый номер элемента, стоящего на маршруте следования данных;  $V$  – 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  $d$

Комплекс моделирования позволяет задать значение  $\mu$  напрямую, т.е. без использования представленного алгоритма, если не требуется высокая точность вычислений. После получения значения  $\mu$  комплекс реализует еще один алгоритм, определяющий список номеров бит, подвергающихся искажениям ( $E_{иск}$ ). Задается параметр, характеризующий разброс положения искажаемых бит – среднеквадратичное отклонение ( $\sigma$ ). Номера искажаемых бит задаются отстающими друг от друга на случайную величину, подчиняющуюся нормальному закону распределения и вычисляемую с помощью применения преобразования Бокса-Мюллера:

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

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

– значения  $r_1$  и  $r_2$  определяются с помощью генератора случайных чисел;

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

$$x = \mu + \sigma z$$

Вычисляемые таким образом значения  $x$  используются для определения номеров искажаемых бит в соответствии с формулой:

$$E_{иск} = E_{иск} + x$$

Определение значений  $E_{иск}$  осуществляется пока очередное значение  $E_{иск}$  не превысит весь объем данных ( $N_{lim}$ ), передаваемый информационным потоком. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 10.

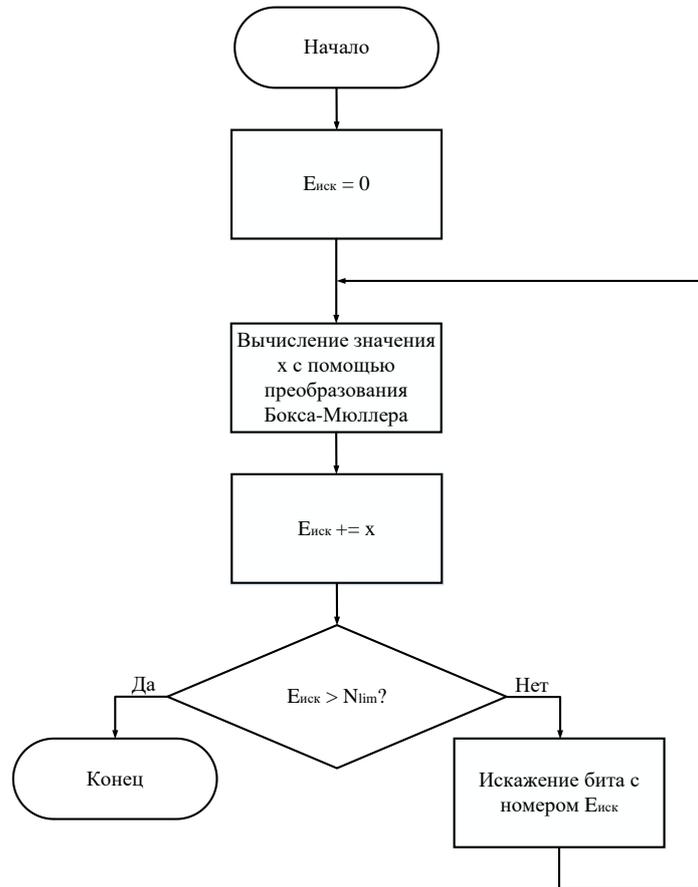


Рисунок 10 – Алгоритм расчета  $E_{иск}$

После процесса моделирования осуществляется анализ информационного взаимодействия. С помощью средств разработанного специального программного обеспечения осуществляется первичная и вторичная обработка информации, собранной анализаторами. В ходе первичной обработки выделяется информация о переданных пакетах из состава информационных потоков:

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

В ходе вторичной обработки рассчитываются значения характеристик информационных потоков. В качестве примеров приводятся следующие формулы ( $n$  – общее число пакетов в составе информационного потока):

- задержка передачи данных:

$$D_{(cp)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{при(i)} - T_{пер(i)}$$

- скорость передачи данных:

$$S_{(cp)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{L(i)}{T_{при(i)} - T_{пер(i)}}$$

– вероятность доставки данных без искажений:

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

В третьей части представлена методика исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов, основной задачей которой является проведение прикладных статистических исследований, направленных на анализ функционирования систем на базе SpaceWire в условиях изменения параметров информационного взаимодействия. Основа методики – применение активного эксперимента (однофакторного). Осуществляется последовательность итераций моделирования и анализа информационного взаимодействия, при которых конфигурации комплекса моделирования остаются постоянными за исключением одного параметра, выбранного в качестве фактора – для него задаются уровни. Первый этап исследования представлен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Первый этап исследования:

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

После получения комплекса характеристик информационных потоков осуществляется проверка воспроизводимости результатов исследования. Значения той или иной характеристики, полученные в ходе одной и той же итерации моделирования, рассматриваются в качестве серии параллельных опытов. Для каждой серии рассчитывается дисперсия воспроизводимости ( $S_{\text{воспр}}^2$ ), после чего проверяется гипотеза об их однородности. Проверка осуществляется с применением критерия Кохрена, в основе которого лежит сравнение двух величин:  $G_{\text{расч}}$ , которая рассчитывается согласно формуле:

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

и  $G_{\text{табл}}$ , которая определяется исходя из количества степеней свободы максимальной дисперсии воспроизводимости и суммарной дисперсии воспроизводимости по соответствующей таблице значений для заданного уровня значимости  $\alpha$ .

В случае если дисперсии воспроизводимости оказываются однородными, происходит переход ко второму этапу исследования, на котором применяются методы корреляционного и регрессионного анализа, с помощью которых обрабатывается полученная информация о характеристиках информационных потоков. Корреляционный анализ начинается с заполнения корреляционной таблицы, структура которой представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Корреляционная таблица

Результативный признак Y	Фактор X			
	$x_1$	...	$x_v$	$\sum$
$y_1$	$m_{11}$	...	$m_{1v}$	$m_1$
...	...	...	...	...
$y_q$	$m_{q1}$	...	$m_{qv}$	$m_q$
$\sum$	$n_1$	...	$n_v$	$n$
Групповое среднее	$\bar{Y}(1)$	...	$\bar{Y}(v)$	$\bar{Y}$

- 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  $X$ ;
- $\bar{Y}^{(i)}$  – групповое среднее значений  $Y$ ;
- $\bar{Y}$  – общее среднее значение  $Y$ .

Далее осуществляется расчет выборочного аналога генерального корреляционного отношения:

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

- где  $\hat{\sigma}_\phi^2$  – выборочная дисперсия значений  $Y$ , которая связана с влиянием на нее  $X$ ;
- $\hat{\sigma}_o^2$  – выборочная дисперсия значений  $Y$ , которая связана с влиянием на нее остаточных факторов.

Регрессионный анализ позволяет определить линейную функцию регрессии:

$$\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}x$$

Параметры  $\hat{a}$  и  $\hat{b}$  рассчитываются исходя из следующих уравнений:

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

$$\hat{b} = \hat{r}_{XY} \frac{\hat{\sigma}_Y}{\hat{\sigma}_X}$$

- где  $\bar{X}$  – общее среднее значений  $X$ ;
- $\bar{Y}$  – общее среднее значений  $Y$ ;
- $\hat{\sigma}_X$  – выборочное среднеквадратичное отклонение значений  $X$ ;
- $\hat{\sigma}_Y$  – выборочное среднеквадратичное отклонение значений  $Y$ ;
- $\hat{r}_{XY}$  – выборочный аналог коэффициента корреляции:

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

- где  $\overline{XY}$  – произведение соответствующих средних значений  $X$  и  $Y$ .

Алгоритмы, в соответствии с которыми заполняется корреляционная таблица, подтверждаются или не подтверждаются гипотезы о равенстве значений  $\hat{\rho}_{Y/X}$  и  $\hat{r}_{XY}$  нулю, рассчитываются параметры, для которых не представлены формулы в автореферате, приводятся в диссертации. Линейная функция регрессии (если может быть определена) является конечным результатом, который предоставляет комплекс моделирования. Исследование завершаются, когда обработаны все характеристики информационного потока.

Таким образом, в рамках главы представлена структура комплекса моделирования в виде взаимосвязанных аппаратно-программных блоков. Описана логика функционирования комплекса, определяемая исходя из разработанных алгоритмов, относящихся к моделированию работы системы на базе SpaceWire и анализу информационного взаимодействия. Выделяется методика исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальной отработки комплекса моделирования. Оработка проводилась с собранной упрощенной моделью распределенной бортовой системы на базе SpaceWire из состава одного из перспективных автоматических КА, которая представлена на рисунке 12.

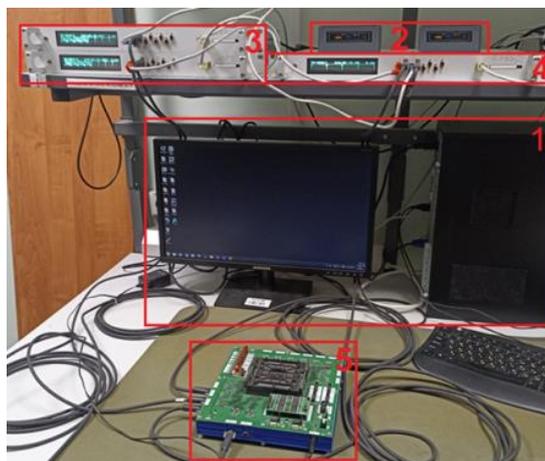


Рисунок 12 – Упрощенная модель системы на базе SpaceWire из состава одного из перспективных автоматических КА: 1 – блок управления; 2 – вычислительные устройства; 3 – интерфейсные мосты; 4 – анализатор; 5 – маршрутизирующий коммутатор

Глава содержит два наиболее значимых подраздела.

В подразделе, посвященном рассмотрению результатов работы отдельных алгоритмов, демонстрируются преимущества применения разработанного комплекса моделирования в сравнении с одним из ранее рассмотренных во второй главе аналогов – SANDS.

Результаты работы алгоритма передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков демонстрируются с помощью моделирования передачи данных из состава информационных потоков, рассмотренных в таблице 1. Рассматривается ситуация, когда при передаче данных из состава информационного потока 2 возникает ошибка. Результаты моделирования данной ситуации с помощью комплекса моделирования и аналога представлены в виде временной диаграммы, иллюстрируемой на рисунке 13.

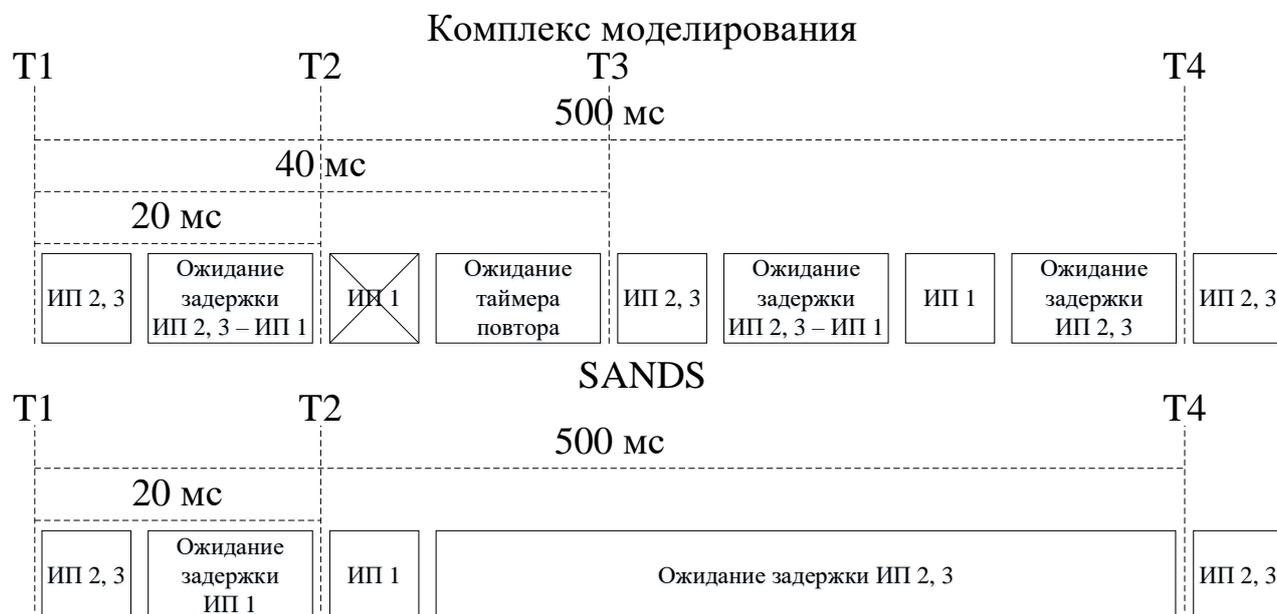


Рисунок 13 – Временная диаграмма моделирования передачи данных из состава взаимосвязанных информационных потоков с помощью разработанного комплекса моделирования и аналога

Диаграмма иллюстрирует корректную обработку информации о функционировании объекта моделирования в отношении взаимосвязи информационных потоков комплексом моделирования (в отличие от аналога), что, в свою очередь, влияет на итоговые характеристики информационных потоков, в частности – на задержки передачи данных. В момент повторной передачи данных из состава информационных потоков 2, 3 модель системы на базе SpaceWire 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  $\sim 4$  раза. Вклад дополнительной задержки может стать критическим для обеспечения требуемого уровня общей задержки передачи данных из состава блокируемого информационного потока.

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.

Результаты работы алгоритма оценки искажений в передаваемых данных демонстрируются на отдельном информационном потоке 1, представленном в таблице 1. Выделяются два типа заряженных частиц, вызывающих искажения, для которых определяются параметры конфигурации (V и T), представленные в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Параметры конфигурации для первого типа заряженной частицы

Элемент, стоящий на маршруте следования данных	V	T, с
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 5 – Параметры конфигурации для второго типа заряженной частицы

Элемент, стоящий на маршруте следования данных	V	T, с
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  $\mu$  выходит равным  $1,66 \cdot 10^7$  (частота внедряемых искажений:  $6 \cdot 10^{-8}$ ). Параметр  $\sigma$  задается равным  $\mu / 10$ .

Для аналога искажения имитируются с помощью коэффициента битовых ошибок (BER) для кабелей в виде  $10^{-N}$ , где для настройки доступно только значение N. Моделируется работа системы на базе SpaceWire с заданием BER равным  $10^{-7}$  (для одного кабеля) и  $10^{-8}$  (для двух кабелей).

На рисунке 14 представлена шкала, иллюстрирующая номера искаженных пакетов, полученные с помощью комплекса моделирования и аналога (с двумя конфигурациями), рассматриваемого информационного потока.

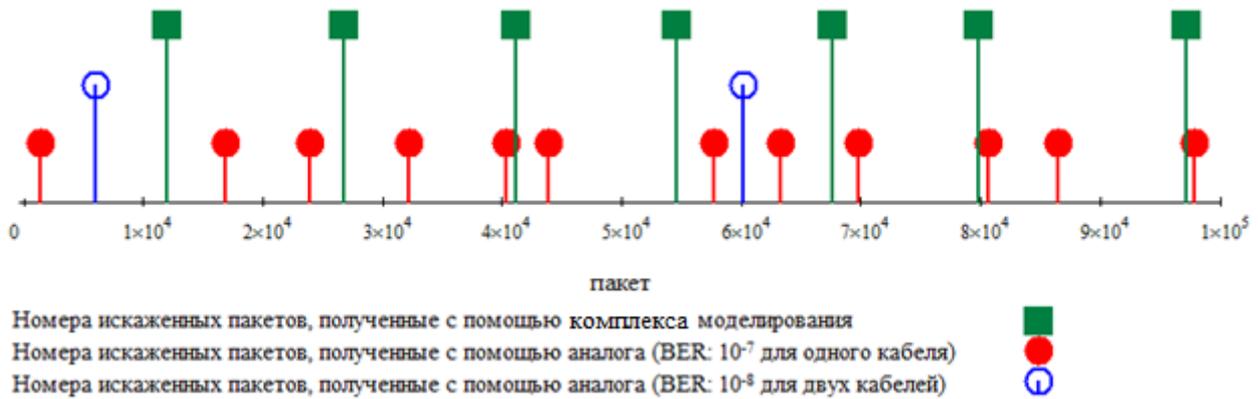


Рисунок 14 – Шкала, иллюстрирующая номера искаженных пакетов, полученные с помощью комплекса моделирования и аналога

Из рисунка следует не только несоответствие номеров искажаемых пакетов, полученных с помощью аналога и комплекса моделирования, но и их количество: 12, 2 для аналога и 6 для комплекса моделирования. Данные показатели отражаются на итоговых значениях характеристики вероятности доставки данных без искажений, которые будут получены в процессе анализа информационного взаимодействия. Таким образом, 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 частоты искажений бит выше, поскольку для аналога данный параметр задается в виде  $10^{-N}$ . Пример иллюстрирует наихудший случай для такой грубой оценки: ближайшие задаваемые с помощью аналога значения ( $10^{-7}$  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.

В подразделе, посвященном рассмотрению результатов работы комплекса моделирования, демонстрируется решение двух задач: определение характеристик информационных потоков, исследование зависимости характеристик информационных потоков от объема передаваемых данных. В процессе решения данных задач комплексу моделирования передаются следующие конфигурации:

1) Конфигурации информационных потоков соответствуют представленным в таблице 1. Исключение составляют конфигурации условия передачи данных (задаются некоторые абстрактные значения периода передачи данных). Кроме того, не учитываются взаимосвязи информационных потоков.

2) Скорость передачи данных (для всех элементов модели системы на базе SpaceWire): 10 Мбит/с.

3) Внедрение искажений в передаваемые данные (грубая оценка):  $\mu = 10^7$ ,  $\sigma = \mu / 10$ .

При решении задачи по определению характеристик информационных потоков результаты работы комплекса моделирования (КМ) сопоставляются с результатами, полученными с помощью SANDS (S), а также аналитических моделей (AM) для характеристик, связанных с временными параметрами. Например, аналитическая модель минимальной задержки передачи данных определяется формулой:

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

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

Результаты анализа информационного взаимодействия представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты анализа информационного взаимодействия

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	КМ	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	$1 - 125 \cdot 10^{-6}$
	АМ	117,62	6,80	–	126,24	–
ИП 2	КМ	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	$1 - 529 \cdot 10^{-6}$
	АМ	513,62	7,79	–	530,24	–
ИП 3	КМ	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	$1 - 103 \cdot 10^{-5}$
	АМ	1013,62	7,89	–	1030,24	–
ИП 4	КМ	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	$1 - 326 \cdot 10^{-6}$
	АМ	313,62	7,65	–	330,24	–

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.

При решении задачи по исследованию зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов в качестве изменяемого конфигурационного параметра комплекса моделирования задается объем передаваемых данных. Для каждой последующей итерации моделирования значение исходного объема передаваемых данных каждого информационного потока умножается на число из ряда [1, 2, ..., 10]. Результаты исследования зависимости характеристик одного из информационных потоков от объема передаваемых данных представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Исследование зависимости характеристик информационного потока 1 от объема передаваемых данных ( $x$  в бит)

Характеристика	$\hat{p}_{Y/x}$	$\hat{r}_{xy}$	$\hat{Y}$
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	$1 - 1,7 \cdot 10^{-5} - 10^{-7} x$
Время выполнения команды, мкс	0,999	0,999	$26,375 + 0,100 x$
Вероятность выполнения команды без искажений	0,012	-0,012	$1 - 2,6 \cdot 10^{-5} - 10^{-7} x$

Таким образом, в рамках главы продемонстрированы преимущества разработанного комплекса моделирования перед аналогами, подтверждена адекватность его функционирования, представлен пример проведенного с его помощью исследования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В процессе выполнения диссертационного исследования решены следующие задачи:

1. В условиях постепенного внедрения технологии SpaceWire в отечественной космической отрасли определена необходимость наличия комплекса моделирования, обеспечивающего поддержку процесса создания распределенных бортовых систем, построенных на основе данной технологии. Рассмотрена информация о типовом объекте моделирования – системе на базе SpaceWire из состава одного из перспективных автоматических 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 комплексов моделирования, выявил недостаточность функциональных характеристик данных разработок для применения в процессе создания систем на базе SpaceWire перспективных автоматических отечественных КА. На данном основании поставлена задача по проведению исследований, направленных на проектирование и разработку комплекса моделирования, отвечающего всем поставленным требованиям.

3. Процесс исследований по проектированию и разработке комплекса моделирования состоял из трех частей:

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

2) Во второй части представлено исследование, связанное с разработкой алгоритмов функционирования комплекса моделирования. Среди алгоритмов выделяются:

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

- алгоритм оценки искажений в передаваемых данных, обеспечивающий решение задачи по обработке информации о внешних факторах, воздействующих на элементы систем на базе SpaceWire, стоящих на маршруте следования данных, в условиях космического пространства.

3) В третьей части представлена методика исследования зависимости характеристик информационных потоков от различных факторов, предназначенная для проведения прикладных статистических исследований для анализа функционирования данных систем в условиях изменения параметров информационного взаимодействия.

4. Проведена экспериментальная отработка комплекса моделирования работы систем на базе SpaceWire, по результатам которой подтверждена его адекватность и выявлен ряд преимуществ по сравнению с аналогами.

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

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. 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. (ВАК К2).

2. 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. (ВАК К2).

3. 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. (ВАК К2).

4. 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. – Т. 75. – С. 16-25. (ВАК К2).

5. 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. – Т. 145, № 2. – С. 4-14. (ВАК К2).

6. 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. (ВАК К2).

***В других изданиях:***

7. 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. Ивлеников // Научная сессия ТУСУР. – Томск, 2021. – С. 148-150.

8. 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.

9. Maksyutin A.S. Algorithms for testing SpaceWire equipment in compliance with RMAP protocol specification / A.S. Maksyutin // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 281-283.

10. 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. – С. 361-363.

11. 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. – С. 14-17.

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