

*На правах рукописи*

**Исаева Ольга Сергеевна**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ  
И ИСПЫТАНИЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(*космические и информационные технологии*)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Красноярск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск

**Научный консультант:**

**Ноженкова Людмила Федоровна**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Панько Сергей Петрович**  
доктор технических наук  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Сибирский федеральный университет, кафедра «Радиоэлектронные системы», профессор

**Массель Людмила Васильевна**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, зав. лаб. информационных технологий в энергетике

**ФИО**

доктор технических наук, профессор  
организация

**Ведущая организация:**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте <https://www.sibsau.ru>

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Панфилов Илья Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Повышение эффективности производства перспективной космической техники требует новых технологических подходов, обеспечивающих цифровую автоматизированную поддержку процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. В случае, когда речь идет о поддержке и автоматизации серийного производства существуют наработанные методы и подходы. Однако для создания новых элементов бортовой аппаратуры космического аппарата не существует универсальных проектных решений. Бортовая аппаратура представляет собой комплекс сложных технических систем, основу которых составляют высокотехнологичные элементы и программное обеспечение. Широкий спектр назначения и условий функционирования космических аппаратов, а также различные подходы к информационному взаимодействию с бортовой аппаратурой на основе разных протоколов связи обуславливают необходимость поиска новых методов и технологий поддержки научно-технических разработок перспективной космической техники. Проектирование и проведение экспериментальных исследований связано с экономическими и технологическими трудностями, что делает актуальной создание новых методов и технологий поддержки научно-технических разработок перспективной космической техники на основе моделирования функционирования бортовой аппаратуры. Для повышения экономической эффективности производственных процессов актуально создание новых подходов, объединяющих интеллектуальные, информационные и графические программно-технические ресурсы в комплекс автоматизированных решений поддержки высокотехнологичного производства.

**Степень разработанности темы.** Российскими и зарубежными учеными сформирован существенный научный задел, полученный при решении задач поддержки производства сложных технических систем. Необходимость развития единых информационных и функциональных подходов к поддержке разработки космических систем отмечается в работах Микрина Е.А., Кульбы В.В., Воробьева А., Eickhoff J., Strzepek A., Guo J., Zeigler, В.Р. и др. Среди комплексных подходов можно отметить направление, связанное с построением инфраструктур имитационного моделирования, обеспечивающих на основе стандартов Европейского космического агентства стандартизацию моделей и их интеграцию на единой технологической платформе. Инфраструктуры применяются с уровня конструкторского бюро и вплоть до гибридных испытательных стендов, обеспечивая информационную поддержку изделия на всех стадиях его

жизненного цикла. Созданием инфраструктур занимаются учёные Liu Y., Zanon O., Arguello L., Miró J., Cazenave S., Cheol-Hea K. и др. Несмотря на хорошую проработку подходов к построению моделей в инфраструктурах и многообразии программных решений в российском научном сегменте технологии моделирования не вносят существенный вклад в разработки, а как правило применяются для отдельных задач проектирования и организации производства космических систем. Для моделирования используются универсальные языки программирования, языки имитационного моделирования, имитационные системы и предметно-ориентированные системы. Активно развиваются методы построения и использования имитационных моделей на основе искусственного интеллекта, онтологий и баз знаний. Этим исследованиям посвящены работы Лахина О.И., Скобелева П.О., Тюгашева А.А., Eito-Brun R., Hennig S. и др. Создание прикладных интеллектуальных систем для задач реальной практической значимости и сложности требует теснейшей интеграции парадигмы искусственного интеллекта с целым рядом методов, подходов и технологий из других областей. В частности, требуется тесное взаимодействие с автоматизированными системами подготовки и проведения испытаний. Рациональная организация процесса испытаний является приоритетной задачей для повышения качества и снижения затрат производства. Для проведения испытаний строятся универсальные испытательные комплексы, такой подход отмечен в работах Перцовского М.И., Ртищева А.В., Чуранова С.А., Гольшевой О.С., Дунаева А.В. и др. Разрабатываются специализированные программные системы управления технологическими процессами испытаний, предоставляющие инструменты имитации и анализа работы бортовых систем при обеспечении штатных и нештатных условий, возникновении аварийных ситуаций, отказе резервируемых систем и каналов связи. Такой подход отмечен в работах Бровкина А.Г., Бурдыгова Б.Г., Гордийко С.В., Везенова В.И., Светникова О.Г., Туркина И., Лучшева П. и др. Однако существующий уровень интеграции не позволяет решать задачи автоматизации этапов подготовки испытательных процедур, затрудняет построение моделей специалистами предметной области и не обеспечивает необходимой унификации тестовых программ.

Перечисленные подходы и методы показали актуальность создания единой сквозной технологии цифровой поддержки производства сложных технических систем, обеспечивающей функциональную преемственность информационных ресурсов и унификацию программных решений. В основе новой технологии должны лежать интеллектуальные методы, способствующие интеграции знаний специалистов предметной области для эффективного решения задач комплекс-

ной поддержки высокотехнологичного производства и формирования информационной памяти предприятий. Создание и применение новой технологии обеспечит повышение эффективности производства, сокращение сроков проектирования и изготовления оборудования, развитие импортнезависимости российских космических разработок и их конкурентоспособность на рынке космических систем.

**Диссертационное исследование выполнено** в рамках ряда научных программ РАН, грантов и научно-исследовательских работ:

1. Комплексный проект Министерства образования и науки РФ «Создание высокотехнологического производства современной бортовой аппаратуры командно-измерительной системы в стандартах, основанных на рекомендациях международного консультационного комитета по космическим системам данных (CCSDS), для использования на негерметичных космических аппаратах» № 02.G25.31.0041 – Договор № 4430/13 от 01 августа 2013 г. «Разработка составной части НИОКТР – программно-математической (имитационной) модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы»;

2. Базовый проект IV.35.1.2. «Методы и технологии аналитической обработки данных и построения программно-технических комплексов и интегрированных систем» Программы СО РАН IV.35.1. «Теоретические основы и технологии создания и применения интегрированных информационно-вычислительных систем для решения задач поддержки принятия решений»;

3. НИОКР: «Модернизация и внедрение подсистемы приема-передачи команд в ПО для проведения автономных испытаний КИС КА. Внедрение на рабочих местах конструкторов средств удаленной работы с ПО подготовки и анализа испытаний КИС КА» Договор № 4016/16 от 11.10.2016 г.;

4. НИОКР: «Модернизация и внедрение подсистемы приема и обработки команд от ПО организации Заказчика для проведения комплексных испытаний КИС КА. Проведение стыковочных испытаний программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры с программным обеспечением организации Заказчика для проведения комплексных испытаний имитатора бортового комплекса управления» Договор № 3325/17 от 20.10.2017 г.;

5. Грант РФФИ и Правительства Красноярского края № 16-41-242042 «Разработка инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры спутниковых систем на основе международных стандартов космической отрасли» (2016–2017 гг.);

6. Грант РФФИ и Правительства Красноярского края № 18-47-242007 «Технология интеллектуальной поддержки конструирования бортовых систем космического аппарата на основе гетерогенных имитационных моделей» (2018–2019 гг.).

**Цель диссертационной работы** – повышение эффективности процессов проектирования, разработки и испытаний командно-измерительных систем космических аппаратов на основе цифровой технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры.

Поставленная цель достигается путем решения следующих задач:

1. Исследование системной проблемы поддержки проектирования, разработки и испытаний командно-измерительных систем космических аппаратов.
2. Анализ существующих методов, технологий и программного обеспечения для поддержки жизненного цикла разработки космических проектов.
3. Разработка технологии поддержки производства бортовых систем космических аппаратов на основе интеграции методов интеллектуального информационно-графического моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры.
4. Разработка комплекса методов построения имитационных моделей функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата, обеспечивающих применение знаний специалистов предметной области.
5. Разработка технологии автоматизации подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата на основе сценарного подхода, методов подготовки испытательных процедур и анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования.
6. Проектирование программной платформы для реализации методов и технологий цифровой поддержки производства командно-измерительных систем космических аппаратов на основе интеллектуальных имитационных моделей.

**Объект исследования** – задачи цифровой поддержки высокотехнологичного производства бортовой аппаратуры космического аппарата.

**Предмет исследования** – методы интеллектуальной, информационной и графической поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов.

**Область исследования.** Работа выполнена в соответствии с пунктами паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации», область наук – технические науки: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 10 «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах», п. 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

**Научно-техническая гипотеза.** Применение технологии интеллектуального информационно-графического моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры способствует повышению эффективности решения задач цифровой поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов.

**Методы исследования,** использованные в работе, основываются на методологии системного анализа, методологии структурного анализа и проектирования (SADT) сложных объектов исследования, методологии инженерии знаний и алгоритмах интеллектуальной поддержки в технических системах, теории реляционных баз данных, методологических и технологических подходах, представленных в научных трудах отечественных и зарубежных ученых в области компьютерной поддержки проектирования, изготовления и анализа функционирования сложных технических систем.

**Новые научные результаты:**

1. Впервые предложена технология сквозной цифровой поддержки процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов на основе интеграции интеллектуальных, информационных и графических методов моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры.

2. Разработан комплекс методов построения интеллектуальных моделей функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Предложены оригинальные методы направленного пошагового проектирования имитационных моделей и формирования баз знаний, методы анализа качества имитационных моделей на основе структурно-графического представления и сопоставления с результатами испытаний бортовой аппаратуры.

3. Предложена унифицированная технология автоматизации испытаний бортовой аппаратуры. Технология включает новые инструменты построения формализованных описаний методов управления, измерения, передачи данных,

контроля и визуализации результатов испытаний, обеспечивает построение и синтаксический контроль сценариев испытаний, поддерживает расширяемость измерительных функций, механизмы повторного использования элементов сценария и взаимодействие с имитаторами бортовых систем.

4. Предложен комплекс оригинальных методов подготовки испытаний и анализа результатов командно-программного управления бортовой аппаратурой, объединяющий методы интеллектуального имитационного моделирования, методы автоматизации измерительного контроля и анализа результатов испытаний на основе прецедентов имитационного моделирования.

5. Предложенная технология реализована в программном комплексе, который включает программное обеспечение «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» (ПММ БА КИС) и «Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» (ПО КПА КИС). Научная новизна заключается в том, что построенный программный комплекс обеспечивает единую технологическую платформу для сквозной комплексной поддержки создания командно-измерительных систем космических аппаратов.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Технология поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры на основе интеллектуальных имитационных моделей обеспечивает сквозную цифровизацию высокотехнологичного производства бортовых систем космических аппаратов.

2. Комплекс методов построения интеллектуальных моделей функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата обеспечивает формализацию и применение уникальных знаний специалистов предметной области.

3. Унифицированная технология автоматизации испытаний обеспечивает проведение технического и функционального контроля бортовой аппаратуры, на основе сценариев управления, измерения, передачи данных и визуализации результатов испытаний.

4. Комплекс методов подготовки испытаний и анализа результатов командно-программного управления бортовой аппаратурой обеспечивает автоматизацию испытаний на основе интеллектуальных имитационных моделей.

5. Программно-технологическая платформа интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры

обеспечивает эффективную поддержку процессов проектирования, разработки и испытаний командно-измерительных систем космических аппаратов.

**Практическая значимость.** Диссертация содержит решение задач, имеющих значение для развития методов и технологий комплексной поддержки высокотехнологичного производства бортовой аппаратуры космического аппарата. Практическим результатом диссертационной работы являются методические, алгоритмические и программные средства, реализованные как целостный интегрированный программный комплекс, предназначенный для моделирования, проектирования, автоматизации подготовки и проведения испытаний, анализа результатов функционирования бортовой аппаратуры и сопровождения исследовательских задач.

Результаты диссертационной работы и программное обеспечение внедрены в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» и Сибирском федеральном университете, что подтверждено актами о внедрении результатов интеллектуальной деятельности и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе результатов и выводов подтверждается: корректным применением методологии системного анализа, имитационного моделирования и инженерии знаний; сопоставлением полученных автором научных результатов с актуальным состоянием работ в исследуемой области; положительным опытом применения разработанной технологии и программного обеспечения для поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата.

**Личный вклад автора.** Все теоретические положения, выносимые на защиту, выполнены лично автором. Автором также выполнено проектирование программного обеспечения и структур баз данных и знаний. В работе использованы экспертные знания специалистов АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (г. Железногорск). Реализация программного обеспечения выполнена специалистами Института вычислительного моделирования СО РАН. Аппаратное обеспечение, библиотека измерительных программ и модели приемо-передающих устройств реализованы специалистами Сибирского федерального университета.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационного исследования были представлены секционными и стендовыми докладами на меж-

дународных и всероссийских научных конференциях, в числе: Всероссийская конференция «Всесибирский конгресс женщин-математиков» (г. Красноярск, 2014 г.); XVIII Международная научная конференция, посвященная 90-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2014 г.), Всероссийская конференция с международным участием «Индустриальные информационные системы» (г. Новосибирск, 2015 г.), XIV Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы информатизации региона» (г. Красноярск, 2013 г., 2015 г.), International conference on computer information systems and industrial applications (Bangkok, Thailand, 2015 г.), XXI Байкальская Всероссийская конференция с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (г. Иркутск, 2016 г.), 2<sup>nd</sup> International conference on artificial intelligence and industrial engineering (Beijing, China, 2016 г.), International conference on electrical engineering and automation (Xiamen, China, 2016 г.), International conference on advanced manufacture technology and industrial application (Shanghai, China, 2016 г.), International conference on measurement, test and industrial application (Chiang Mai, Thailand, 2016 г.), Вторая Российско-Тихоокеанская конференции по компьютерным технологиям и приложениям (г. Владивосток, 2017 г.), International conference on applied mathematics, modelling and statistics application (Beijing, China, 2017 г.), 2<sup>nd</sup> International conference on control, automation and artificial intelligence (Sanya, China, 2017 г.), 2<sup>nd</sup> International conference on test, measurement and computational method (Beijing, China, 2017), International conference on computer, electronics and communication engineering (Sanya, China, 2017 г.), International conference on computer modeling, simulation and algorithm (Beijing, China, 2018 г.), International conference on mathematics, modeling, simulation and statistics application (Shanghai, China, 2018 г.), International workshop «Advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering» (Красноярск, 2019).

Развёрнутые доклады по результатам диссертационной работы представлялись на научных семинарах институтов РАН и на заседании Президиума Сибирского Отделения РАН.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 56 работ, в том числе 20 – в рецензируемых российских журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 14 – индексируемых в Scopus, Web of Science, 6 – свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 16 статей в других рецензируемых изданиях и материалах научных конференций. Подготовлены материалы для 12 научных

отчетов о выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, разработана программно-техническая документация.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников из 353 наименований, списка сокращений и 2-х приложений. Полный объём работы составляет 367 страниц, включая 171 рисунок и 34 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность диссертационной работы, научная новизна, достоверность и обоснованность полученных результатов, показана их практическая значимость. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы и положения, выдвигаемые на защиту, определен непосредственный вклад автора в представленные результаты.

**В главе 1** рассмотрена системная проблема поддержки жизненного цикла разработки космических проектов, приведены результаты анализа системной проблемы, показана актуальность повышения эффективности решения конструкторских задач за счет автоматизации и применения методов моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры.

Показано, что рассматриваемая проблема обладает характерными признаками – комплексностью, многоаспектностью, неоднозначностью, слабой формализуемостью, и для её решения требуется интеграция интеллектуальных, информационных и графических программно-технологических инструментов в рамках единой технологии.

Бортовые системы космического аппарата решают широкий круг задач, в их числе: обеспечение обмена информацией с наземным комплексом управления; измерение текущих навигационных параметров движения космического аппарата на орбите; сбор, хранение, обработка и передача телеметрической информации; управление работой бортовых систем космического аппарата и др. Управление включает совокупность операций по оценке состояния движения и аппаратуры космического аппарата, а также принятие решений и выработку управляющих воздействий на основе полученных оценок. Управление выполняется командно-программным методом, при котором применяются команды прямого действия, направленные на непосредственное исполнение в бортовых системах или массивы командно-программной информации, закладываемые в память бортовых систем. Существенную роль в обеспечении работоспособности и управляемости космическим аппаратом играет командно-измерительная система, которая по сути является интерфейсом между системами космическо-

го аппарата и наземным комплексом управления. В данной научной работе основное внимание уделено проблемам поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительных систем. Полученные в результате технологии и методы могут быть применимы и для других бортовых систем космического аппарата.

Современная командно-измерительная система представляет собой сложный комплекс технологических и вспомогательных подсистем, объединенных общей системой управления и функционирующих в непрерывном взаимодействии с бортовыми и наземными системами (Рисунок 1). Командно-измерительная система (КИС) состоит из устройств приема, передачи данных и интерфейсного модуля, который предназначен для анализа и выполнения команд. Команды на изменение конфигурации или настроек командно-измерительной системой выполняются ею самой, команды для осуществления внешнего командно-программного управления бортовой аппаратурой передаются в бортовые системы (БЦВК – бортовой цифровой вычислительный комплекс или БУ – блок управления БКУ – бортовой комплекс управления).

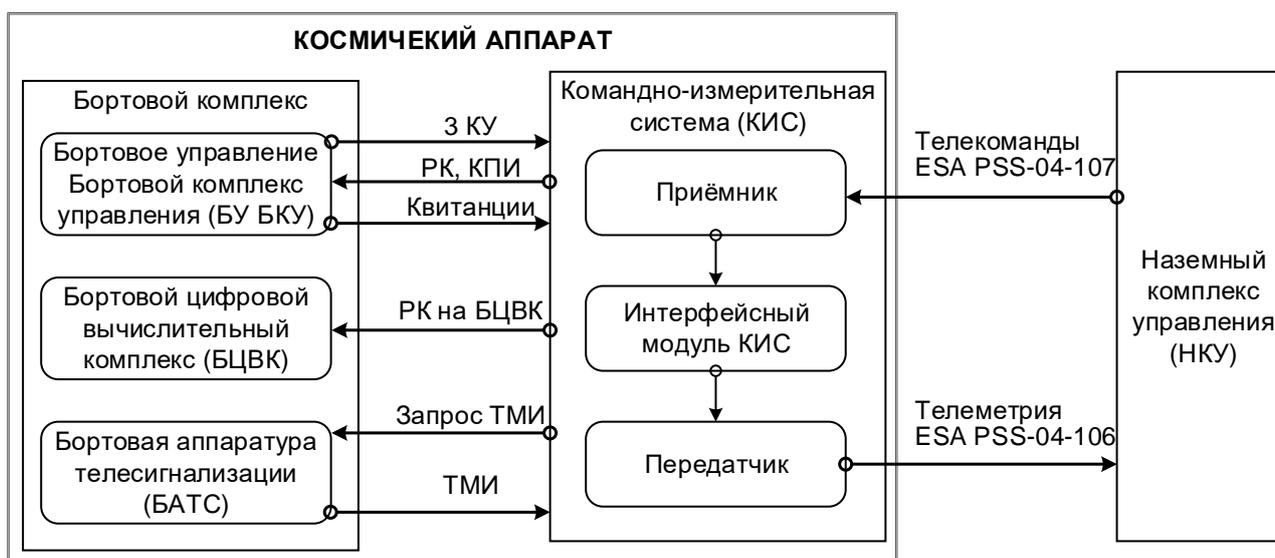


Рисунок 1 – Схема функционирования командно-измерительной системы

Результаты отработки команд отражаются в пакетах телеметрической информации (ТМИ), за её формирование отвечает бортовая аппаратура телесигнализации (БАТС). Интерфейсный модуль КИС формирует квитанцию о выполнении команд либо на основе собственной информации о прохождении команды, либо по данным, полученным от бортовых систем. Получает от БАТС телеметрию, дополняет её и передает в наземный комплекс управления.

Существенное влияние на процессы проектирования и разработки бортовых систем оказывают такие характеристики сложности, как: значительное число компонент со множеством связей, режимов работы и команд управления; сложное поведение, которое трудно предсказать или описать аналитически; отсутствие универсальных проектных решений и унифицированных протоколов информационного взаимодействия, высокая стоимость ошибок и существенные трудозатраты при экспериментальных исследованиях готовых систем. Сложность объекта исследования затрудняет применение типовых средств автоматизации для решения вышеперечисленных задач.

Основные задачи поддержки производства бортовой аппаратуры: проектирование основных принципов информационно-коммутационного взаимодействия бортовых систем; моделирование особенностей функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата в соответствии с различными условиями эксплуатации и назначением; автоматизация испытаний оборудования и анализа получаемых результатов; поддержка исследовательских функций и подготовка специалистов к работе с техническими устройствами и программным обеспечением.

Анализ современного состояния научных исследований и методов поддержки жизненного цикла разработки космических проектов позволил выделить особенности построения и применения имитационных моделей для поддержки исследования сложных технических систем. Показано, что моделирование способствует повышению эффективности и надежности проектируемой бортовой аппаратуры. Рассмотрены примеры успешного применения методов искусственного интеллекта и баз знаний в таких исследованиях. Построение баз знаний, отражающих функциональные и технологические процессы, позволяет обмениваться знаниями между группами инженеров, имеющими большой опыт в различных аспектах решаемых задач, и является ключевым фактором, создающим предпосылки для успешного выполнения проектов. Исследованы вопросы оценки качества построенных моделей. Для оценки разрабатываемых космических систем и анализа их соответствия техническим заданиям требуется создание технологии проведения испытаний бортовой аппаратуры, узлов или отдельных блоков и бортовых систем в целом. Технология должна быть ориентирована на предметную область, обеспечивать работу со специализированными типами данных, отражающими такие понятия, как телеметрическая информация, команда управления, массив командно-программной информации, разовая команда, квитанция и другие. Несмотря на существующий научный задел в данной области, отсутствие единой технологической основы не позволяет

обеспечить функциональную преемственность информационных ресурсов и унификацию программных решений, необходимых для цифровой поддержки разработки бортовой аппаратуры космического аппарата. Для повышения эффективности научно-производственных процессов разработки бортовой аппаратуры космического аппарата необходимо объединение интеллектуальных, информационных и графических инструментов построения и применения интеллектуальных имитационных моделей в комплексную технологию. В этой связи тема диссертационного исследования является актуальной.

На основании проведенного анализа системной проблемы и существующих подходов к ее решению сформулированы задачи диссертационной работы.

В главе 2 представлена технология цифровой поддержки производства бортовых систем на основе интеллектуальных имитационных моделей. Выполнен структурно-функциональный анализ предметной области, результатом которого стала модель, отображающая функциональные задачи новой технологии, этапы их решения и методы, необходимые для успешной поддержки высокотехнологичного производства бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата (Рисунок 2).

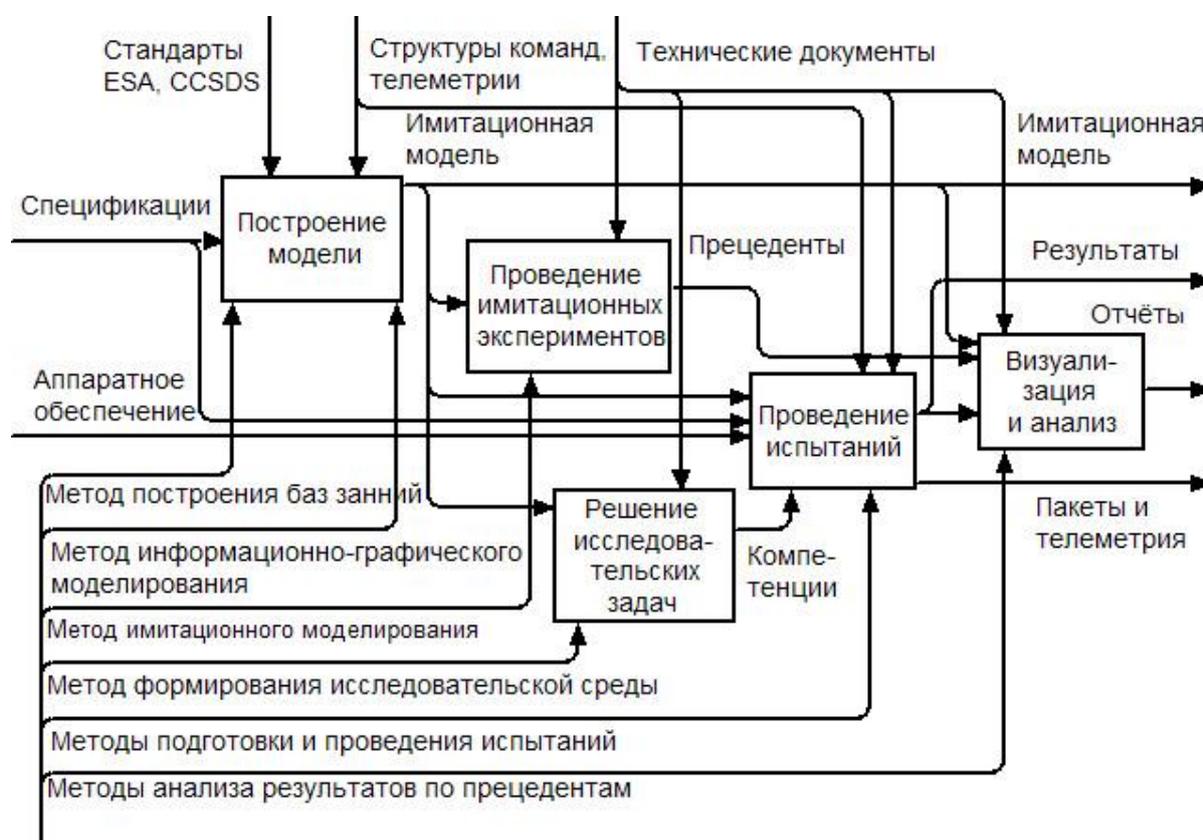


Рисунок 2 – Технология поддержки производства бортовых систем на основе интеллектуальных имитационных моделей

Предложенная технология представляет собой единый комплекс, интегрирующий методы построения имитационных моделей, формирования баз знаний, проведения имитационных экспериментов, поддержки подготовки и автоматизации испытаний бортовой аппаратуры и анализа результатов по прецедентам функционирования имитационной модели. Технология обеспечивает семантическую преемственность информационных ресурсов и специализированных структур данных от инструментов моделирования к инструментам автоматизации испытаний для проектирования и анализа функционирования готовых устройств. Базы знаний, входящие в состав информационных ресурсов, способствуют формированию и обмену знаниями между группами инженеров-конструкторов, имеющими большой опыт в различных аспектах решаемых задач. Технология предоставляет универсальные расширяемые инструменты для моделирования, построения методик испытаний и анализа данных, тем самым обеспечивая эффективное решение задач, возникающих в деятельности конструктора бортовой аппаратуры космического аппарата.

В основе новой технологии лежит понятие интеллектуальной модели имитации функционирования бортовой аппаратуры. Предложен комплекс методов построения и оценки моделей.

*Модель*  $S = \langle G, F, T \rangle$  представляет собой набор множеств, описывающих состояние имитаторов физических устройств и их функционирование в каждый момент времени, где  $G$  – структурно-параметрическое описание (множество элементов структуры),  $F$  – функциональное описание (множество методов функционирования),  $T$  – моменты времени наблюдения.

*Структурно-параметрическое описание*  $G = \langle B, I, C, D, P \rangle$ , где  $B$  – множество элементов модели – интеллектуальных агентов, представляющих функции отдельных физических устройств;  $I$  – множество коммутационных интерфейсов;  $C$  – множество типизированных информационных зависимостей, описывающих коммутационные соединения между агентами;  $D$  – множество структур данных, включающее стандартные типы данных и специальные конструкции:  $D^k$  – структура пакетов команд,  $D^t$  – структура пакетов телеметрической информации;  $P$  – множество параметров,  $P = X \cup Y \cup K$ , где  $X$  – множество входных воздействий,  $Y$  – множество наблюдаемых (выходных) параметров,  $K$  – множество команд.  $K = K_{КИС} \cup K_{БКУ} \cup K_{КПА}$  где  $K_{КИС}$  – команды, предназначенные для управления функциями командно-измерительной системы,  $K_{БКУ}$  – команды для бортового управления БКУ,  $K_{КПА}$  – команды управления контрольно-проверочной аппаратурой.

Множество  $B = \{B_i\}$ , где  $B_i = \langle N, E, I^i, X^i, Y^i \rangle$ ,  $i = [1, \dots, |B|]$ ,  $|B|$  – количество элементов модели,  $N$  – наименование элемента,  $E$  – тип представляемого устройства,  $I^i \subseteq I$  – подмножество коммутационных интерфейсов  $I$ ,  $X^i \subseteq X$ ,  $Y^i \subseteq Y$  – подмножества входных и выходных параметров.

Множество  $I^i = \{I_q^i\}$ , каждый интерфейс  $I_q^i$  имеет характеристики: тип  $Tr(I_q^i)$ , направленность передачи  $Rt(I_q^i)$ , признак состояния  $Onf(I_q^i)$ .

Множество  $C = \{C^{ij}\}$ , где  $C^{ij}$  – коммутационное соединение между элементами модели  $B_i$  и  $B_j$ .  $C^{ij} = \{C_{nm}^{ij}\}$ , где  $C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle$  – соединение между  $B_i$  и  $B_j$  по интерфейсам  $I_n^i$  и  $I_m^j$ ,  $\tau$  – параметр.

Функциональное описание  $F = \{Y = V(X), R: A \rightarrow Z\}$ , где  $V$  – виртуальные инструменты, определяющие зависимость входных параметров  $X$  от выходных параметров  $Y$ ,  $R$  – множество правил базы знаний,  $A = A_1 \& A_2 \& \dots \& A_r$  – логическое выражение, определяющее условие выполнения правила,  $Z = Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  – действия, изменяющее состояние модели. В условие  $A$  могут входить элементы из множества интерфейсов  $I$ , на которые поступают данные из  $X$ , команды из  $K$ , таймеры из  $T$ , определяющие время наступления событий. Действия  $Z$  представляют собой функции: передачи данных на интерфейсы из  $I$ , определения выходных параметров из  $Y$ , запуска таймеров из  $T$ . База знаний структурирована и разделена на группы, определяемые элементами модели  $R^i \subseteq R$ , где  $R^i$  – множество правил функционирования элемента  $B_i$ .

Правила позволяют управлять режимами работы, изменять значения параметров, определять активный интерфейс для основного и резервного комплектов и последовательности действий командно-программного управления бортовой аппаратурой. Примеры правил:

**<БАТС> Если** интерфейс «Вход» находится в состоянии «Активный» **И** данные, полученные по интерфейсу «Вход» равны значению переменной «Запрос телеметрии» **То** запустить таймер «Таймер формирования ТМ».

**<МИ КИС> Если** РК = «U10002N»

**То** Скорость формирования ТМИ = «1000 бит/с»

**<МИ КИС> Если** РК = «U10005N» **То** Выход = «Выход\_МКО».

Задача проектирования модели  $S$  сводится к поиску последовательности преобразований моделей  $S^1, S^2, \dots, S^n$ , которые отражают пошаговое приближение к системе-оригиналу  $S^0$ . Существуют различные способы преобразования модели, выбор наилучшей последовательности представляет собой сложную

задачу с большим количеством вариантов решений. Предложен метод проектирования модели (Рисунок 3), введены критерии оценки построенных моделей.

Выполнение алгоритма начинается с формирования предварительного описания модели  $S^1$ . Далее выполняется сбор и консолидация исходной информации о назначении, характеристиках, условиях и способах работы моделируемой системы. Для оценки моделей вводятся критерии адекватности и эффективности.

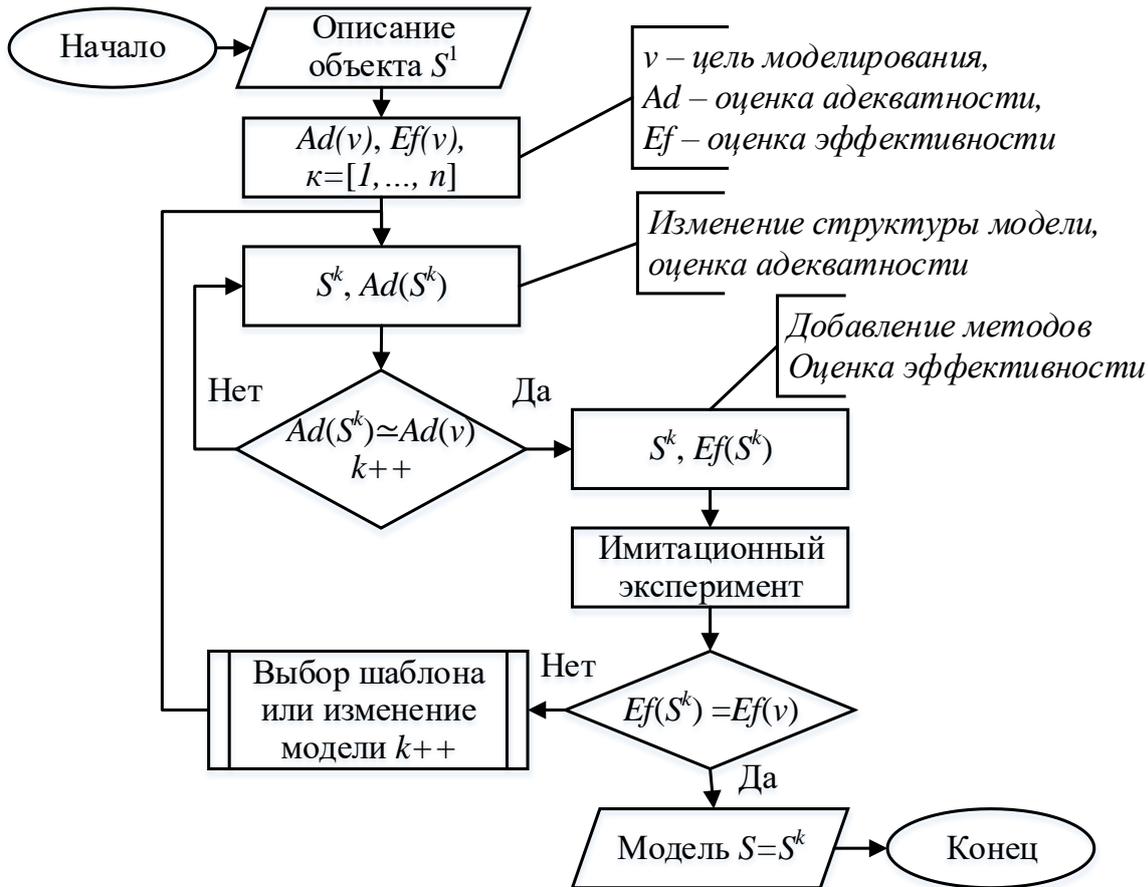


Рисунок 3 – Алгоритм построения модели

Требуется определить, какие критерии будут наиболее значимыми при данной реализации модели и могут изменяться в зависимости от целевого назначения  $v$ . Например, адекватность может рассматриваться как степень наглядности модели и задаваться линейной функцией от структуры модели:  $Ad(S) = a \times |B| + b \times |I| + c \times |C|$ , где  $a, b, c$  – весовые коэффициенты. Эффективность модели  $Ef$  определяется экспертом в виде количественных или качественных показателей. Например, для оценки эффективности может быть использован расчет функциональной нагрузки на элементы модели:  $Ef(S) = \sum_{i=1}^{|B|} |R^i|$ . Оценка эффективности модели выполняется на основе имита-

ционных экспериментов. Для изменения модели предложено использовать шаблоны, представляющие собой отдельные режимы работы бортовой аппаратуры космического аппарата. Изменение модели выполняется до тех пор, пока эксперт не принимает решение о достижении выбранных критериев эффективности.

Далее в главе 2 описаны алгоритмы имитационного моделирования и представлен метод имитации командно-программного управления бортовой аппаратурой, который стал основой для создания специализированных процедур испытаний.

Предложен следующий метод формирования правил модели на основе программы испытаний бортовой аппаратуры (Рисунок 4). Метод позволяет для каждой команды  $k_i \in K$  ( $i=1, \dots, Nk$ , где  $Nk$  – число команд, по которым проведены испытания) формировать правила базы знаний, содержащие параметры передачи данных и критерии контроля их прохождения и отработки.

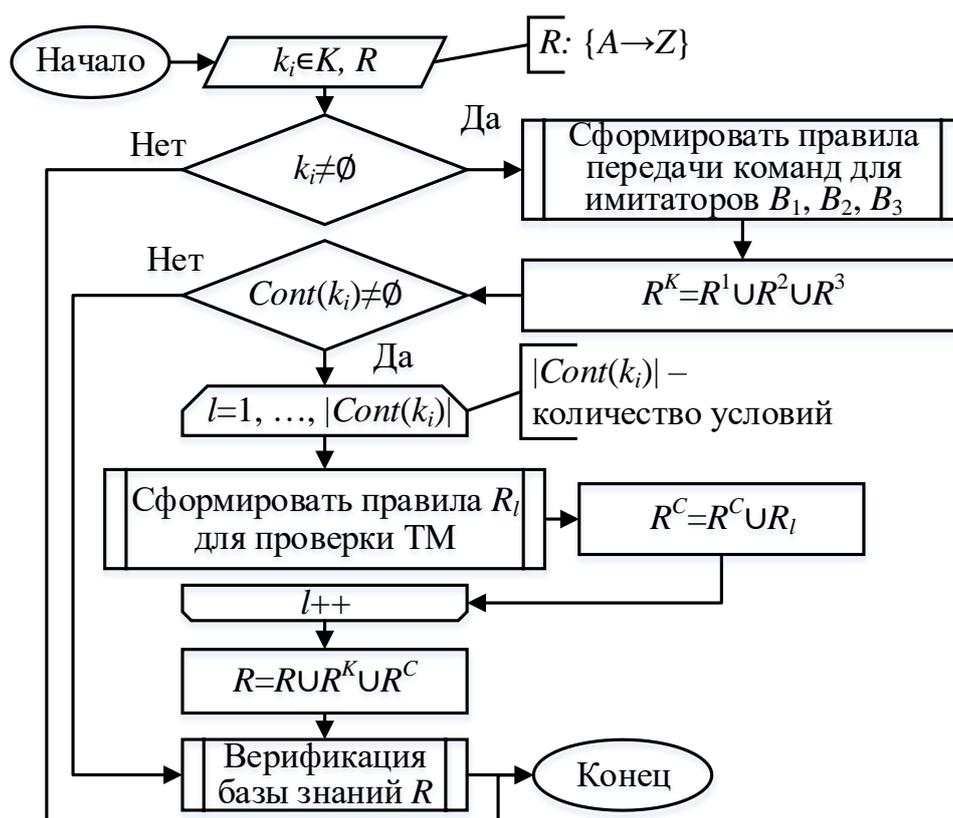


Рисунок 4 – Метод формирования правил на основе программы испытаний

На первом этапе формируются правила приёма-передачи команд для элементов модели:  $B_1$  – имитатор командно-измерительной системы;  $B_2$  – имитатор наземного комплекса управления в части передачи команд и анализа телемет-

рии;  $B_3$  – имитатор бортового комплекса управления. В правилах задаются структуры пакетов команд и телеметрии, выбранные из испытательных процедур. На втором этапе формируются правила контроля прохождения и отработки команд, в алгоритме они обозначены как  $R_l$ . Эти правила задают условия проверки телеметрической информации (ТМ). Примеры формируемых автоматически правил:

$\langle B_1 \rangle$  **Если** на интерфейс  $I_1$  поступил массив байт  $k$   
**И** структура массива =  $D^k$  **И**  $k \in K_{\text{БКУ}}$  **То** передать  $k$  на интерфейс  $I_2$ .

$\langle B_2 \rangle$  **Если** на интерфейс  $I_3$  поступил массив байт  $TM$   
**И** структура массива =  $D'$  **То** параметр  $TM_j$  по адресу  $Adr_l = Res_l$ .

В работе предложены методы верификации и контроля построенных имитационных моделей. На этапе проектирования бортовой аппаратуры, при отсутствии данных функциональных испытаний предлагается использовать метод структурно-графического анализа, основанный на привлечении качественного опыта экспертов предметной области. Метод позволяет выявлять зависимости отдельных элементов модели, ошибки базы знаний, недостающие или избыточные данные и структуры, для которых не заданы правила в базе знаний, обеспечивая контроль полноты функционального представления. Результатом выполнения метода является список ошибок.

После изготовления оборудования критерии контроля, заданные в испытательных процедурах и результаты испытаний, рассматриваются как эталонные значения для модели. Предложен метод сопоставления результатов испытаний и прецедентов имитационного моделирования. Прецеденты содержат для каждой команды, выполненной при проведении имитационных экспериментов, телеметрическую информацию, параметры и правила её получения и отработки. Если значения параметров телеметрии прецедентов имитационной модели и объекта контроля совпадают, то выполняется переход к анализу следующей команды. Если значения не совпадают или в модели отсутствуют прецеденты для выбранной команды, то формируется список ошибок. При обнаружении несоответствия модели и объекта моделирования выполняется формирование новых правил базы знаний на основе испытательных процедур.

В главе 2 также представлены методы подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата.

Задача испытаний бортовой аппаратуры заключается в создании и передаче последовательности управляющих воздействий на объект контроля и обес-

печении сбора, мониторинга и анализа данных, возникающих в результате его функционирования. В работе предложены методы автоматизации автономных испытаний и методы поддержки комплексных испытаний. *Автономные испытания* проводятся без подключения объекта контроля к сопряженному оборудованию. *Комплексные испытания* выполняются в составе комплекса сопряженных бортовых систем с учётом их взаимодействия с объектом контроля.

Предлагаемая технология автоматизации испытаний имеет двухуровневую архитектуру. На верхнем уровне представлены методы подготовки и проведения испытаний. На нижнем уровне расположены библиотеки измерительных программ (виртуальных инструментов, далее – VI), созданных, как правило, в среде технического моделирования и реализующих взаимодействие объекта контроля с испытательным оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры (КПА). Методы создания КПА и библиотек программ работы с оборудованием не являются частью данного исследования. Их разработка выполнена специалистами Сибирского федерального университета.

Схема организации взаимодействия аппаратного обеспечения, программного обеспечения и объекта контроля при подготовке и проведении автономных испытаний показана на рисунке (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Схема организации автономных испытаний

Предложен сценарный метод автоматизации испытаний, определяющий формальные правила порождения испытательных процедур и алгоритмы их интерпретации.

Сценарий – формализованная последовательность испытательных действий.  $Sc = \langle N_S, [Tsk_q \subseteq Tsk, BeginSt(Tsk_q), EndSt(Tsk_q), Cy(Tsk_q)], q=1, \dots, |Tsk_q| \rangle$ , где  $N_S$  – наименование,  $Tsk_q$  – задания (методы),  $BeginSt(Tsk_q)$  и  $EndSt(Tsk_q)$  – этапы выполнения,  $Cy(Tsk_q)$  – количество циклов.

Задание – совокупность действий, направленных на решение определенной задачи в сценарии.  $Tsk_q = \langle N_T, [Act_r \subseteq Act, BginSt(Act_r), EndSt(Act_r)], 1 \leq r \leq |Act| \rangle$ , где

$N_T$  – наименование,  $Act_p$  – множество действий в задании,  $BginSt(Act_r)$  и  $EndSt(Act_r)$  – этапы выполнения действия.

Действие – метод управления оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры или измерения параметров функционирования объекта контроля.  $Act_p = \langle N_A, X^p, Y^p = VI_p(X^p), Tun(X^p), Mpar(Y^p), StartA, StopA \rangle$ , где  $N_A$  – наименование,  $X^p$  – значения входных переменных,  $Y^p$  – результаты измерений,  $VI_p$  – метод (виртуальный инструмент),  $Tun(X^p)$  – настройки,  $Mpar(Y^p)$  – методы мониторинга,  $StartA$  – условие запуска действия,  $StopA$  – условие остановки.

Синтаксическая диаграмма сценария испытаний показана на рисунке (Рисунок 6). Узлы синтаксической диаграммы описывают элементы сценария, линии – последовательность формирования элементов, дуги – показывают возможность их повторения.

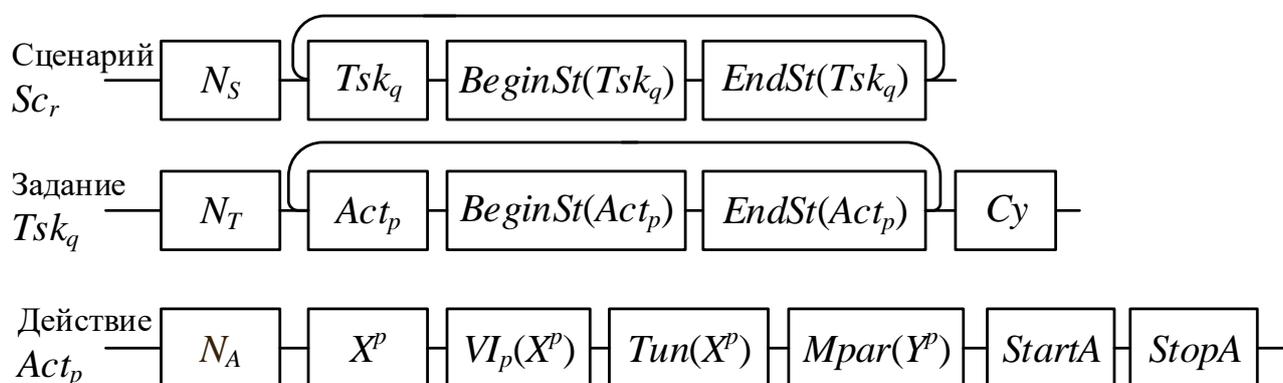


Рисунок 6 – Синтаксическая диаграмма сценария

Методика испытаний декомпозируется на подзадачи, каждая из которых формируется независимо от других. Подзадачи реализуются в виде заданий, в которые, в свою очередь, входят действия. Действия представляют собой указания на методы взаимодействия с оборудованием, реализованные в виде библиотеки виртуальных инструментов.

Предложены алгоритмы выполнения сценариев испытаний. При выполнении сценариев анализируется его состав, и выбираются и выполняются задания  $Tsk_s$ , начало которых совпадает с текущим этапом, то есть  $BginSt(Tsk_s) = l$  для  $l$ -го этапа. Переход к следующему этапу происходит только после завершения всех заданий текущего этапа. Задания, для которых  $En(Tsk_s) > l$  продолжают выполнение при переходе к следующему этапу сценария.

Предложен метод автоматизации испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой. Схема организации испытаний приведена на рисунке (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Схема испытаний командно-программного управления

Исследование алгоритмов функционирования имитационной модели позволило выделить ключевые параметры и настройки имитаторов и создать на их основе метод автоматизации испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой. Метод обеспечивает информационную преемственность структур данных и команд от имитационной модели и упрощает построение испытательных процедур.

Синтаксическая диаграмма метода автоматизации испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой приведена на рисунке (Рисунок 8).

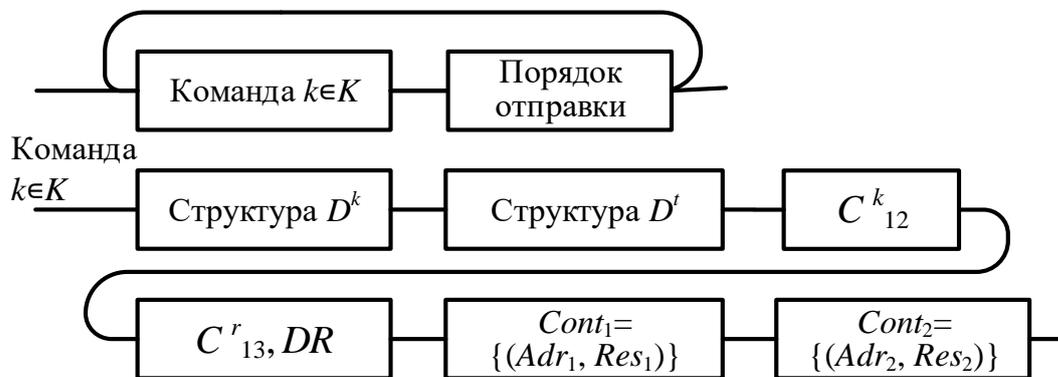


Рисунок 8 – Синтаксическая диаграмма метода испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой

Формирование испытаний сводится к заданию для каждой команды  $k \in K$  и параметров:  $D^k$  – «Структура пакета данных команды»,  $D^t$  – «Структура телеметрии»,  $C_{12}^k$  – «Интерфейс НКУ – КИС»,  $C_{13}^r$  «Интерфейс МИ КИС – БКУ»,  $DR$  – ожидаемое значение по интерфейсу  $C_{13}^r$ ,  $Cont(k) = \{(Adr, Res)\}$  – множество критериев контроля параметров телеметрии для команды  $k$ , поступающей с  $C_{12}^t$ .  $Adr$  – адрес параметра в телеметрии,  $Res$  – значение для сравнения. Множество

критериев разбито на два подмножества:  $Cont(k)=Cont_1(k)\cup Cont_2(k)$ , где  $Cont_1(k)$  – «Контроль квитанции по ТМ»,  $Cont_2(k)$  – «Контроль реакции на команду».

Для поддержки проведения комплексных испытаний бортовой аппаратуры предложен метод, обеспечивающий взаимодействие автоматизированного испытательного комплекса предприятия (АИК) с объектом контроля. Метод позволяет выполнять трансляцию испытательных процедур в объект контроля и получаемых от него данных – в автоматизированный испытательный комплекс. Схема информационного взаимодействия показана на рисунке (Рисунок 9).

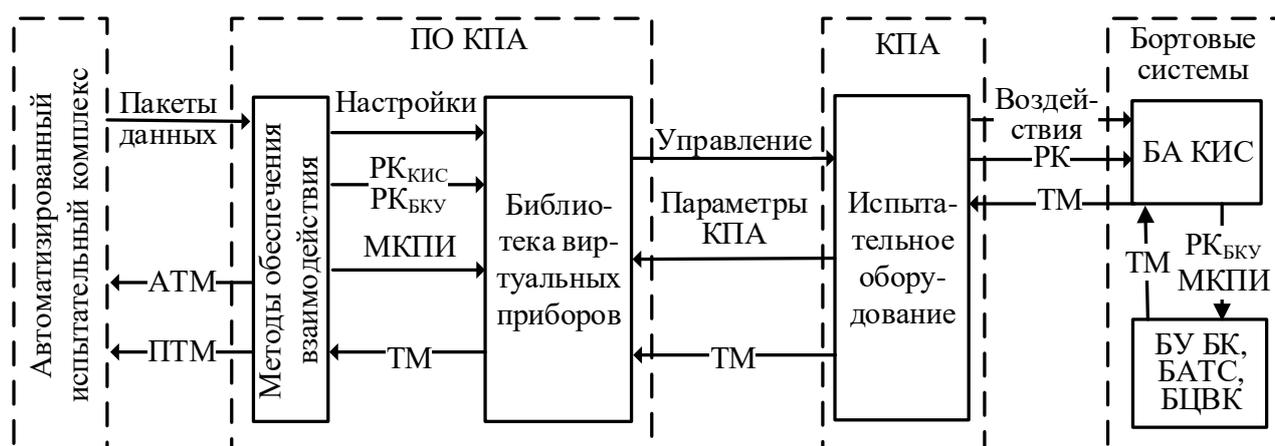


Рисунок 9 – Схема организации комплексных испытаний

От АИК поступают пакеты команд и массивы командно-программной информации (КПИ). Команды предназначены для командно-измерительной системы –  $РК_{КИС}$ , бортового комплекса управления –  $РК_{БКУ}$  и управления оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры –  $РК_{КПА}$ . От КПА и объекта контроля в АИК поступают квитанции на отработанные команды, телеметрическая информация, а также сообщения в протокол испытаний. Предусмотрено два типа пакетов телеметрической информации – адресная (АТМ) и позиционная (ПТМ). Адресная телеметрия содержит параметры контрольно-проверочной аппаратуры, а позиционная – параметры бортовых систем.

Синтаксическая диаграмма метода поддержки комплексных испытаний приведена на рисунке (Рисунок 10).

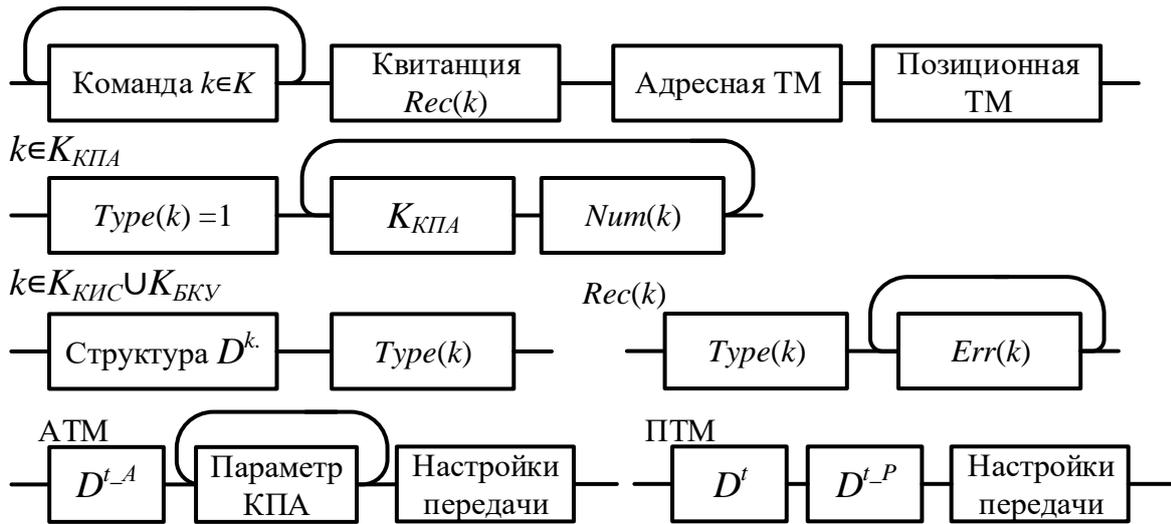


Рисунок 10 – Синтаксическая диаграмма метода поддержки комплексных испытаний

Диаграмма определяет необходимые элементы формирования методики испытаний: команды, квитанции, пакеты адресной и позиционной телеметрии. К множеству структур данных добавляются структуры адресной телеметрии –  $D^{t-A}$  и позиционной телеметрии  $D^{t-P}$ . Тип команды  $Type(k)$  принимает значения: 1 – команда управления КПА, 2 – команда управления КИС, 3 – команда БКУ.

В работе предложены алгоритмы поддержки комплексных испытаний в составе: алгоритм информационного взаимодействия с автоматизированным испытательным комплексом, алгоритм выполнения команд, алгоритм передачи адресной телеметрии и алгоритм передачи позиционной телеметрии.

Для поддержки испытаний командно-программного управления выполнен анализ построенных имитационных моделей и предложены метод генерации испытательных процедур на основе базы правил имитационной модели и метод анализа результатов испытаний на основе прецедентов моделирования. Алгоритм генерации испытательных процедур показан на рисунке (Рисунок 11). Алгоритм показывает последовательность действий для создания испытательные процедуры командно-программного управления бортовой аппаратурой. Формируется подмножество правил базы знаний, определяющее порядок работы имитаторов наземных и бортовых систем при моделировании выбранных команд. Выбираются правила  $R^j: A^j \rightarrow Z^j$ , в которые входит команда  $k_i$ . Для каждого элемента модели строятся цепочки  $Rch^j$ , выполняемые в процессе логического вывода. В построенные цепочки входят правила приема-передачи данных и критерии контроля прохождения команд.

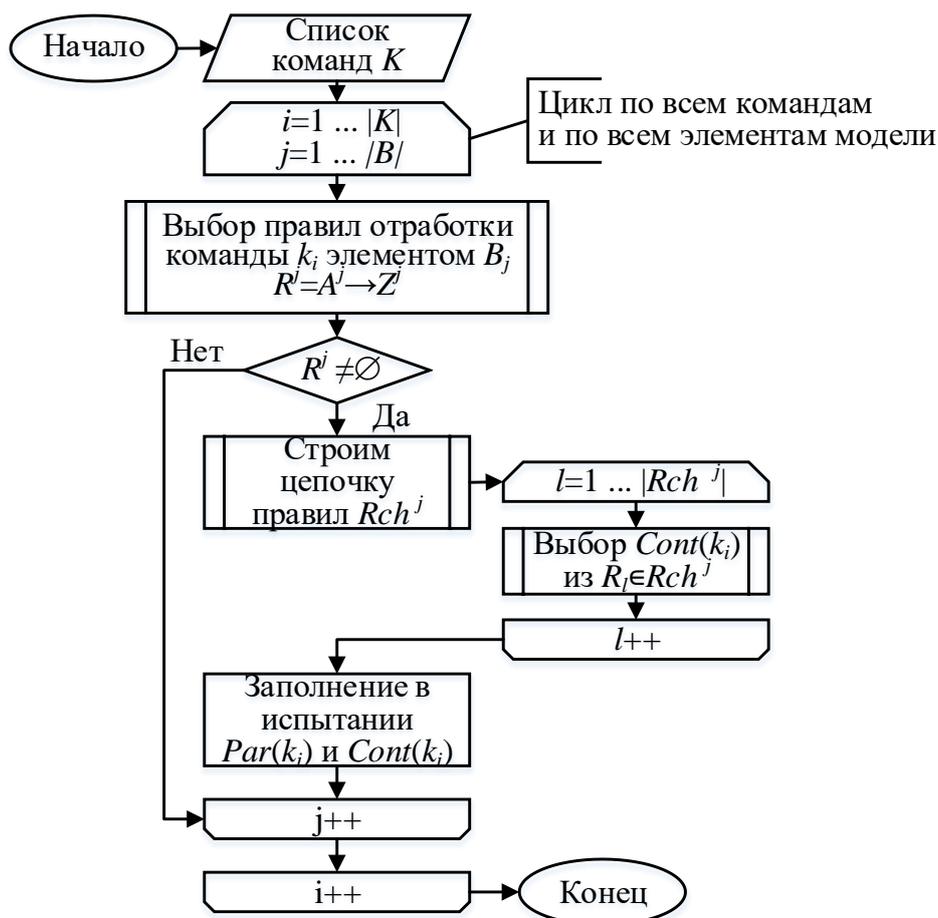


Рисунок 11 – Алгоритм генерации испытательных процедур

Формируются параметры  $Par(k_i)$ :  $D^k$  – структуры команд,  $D^l$  – структуры телеметрии,  $C_{12}^k$  – интерфейс, по которому передаются команды,  $C^r$  – коммутационные соединения для ответов на команды,  $DR_i$  – ответ имитатора бортовых систем объекту контроля. Выбираются критерии контроля  $Cont(k_i)$  в виде пар  $(Adr, Res)$ , где  $Adr$  – адрес параметра в телеметрии,  $Res$  – значение для сравнения. Найденные параметры и критерии контроля записываются в программу испытаний. Испытательные процедуры определяют перечень и порядок выполнения команд и служат основой для построения сценария испытаний.

Предложен метод анализа результатов испытаний на основе прецедентов имитационного моделирования. Алгоритм анализа испытаний показан на рисунке (Рисунок 12). Для анализа результатов испытаний формируются  $TM\_List$  – множество пакетов телеметрической информации объекта контроля и  $Prec\_List$  – множество прецедентов имитационной модели.  $Prec\_List = \langle P\_TM, P\_Rule, P\_K \rangle$ , где  $P\_TM$  – телеметрия, формируемая имитационной моделью,  $P\_Rule$  – правила базы знаний,  $P\_K$  – команда.

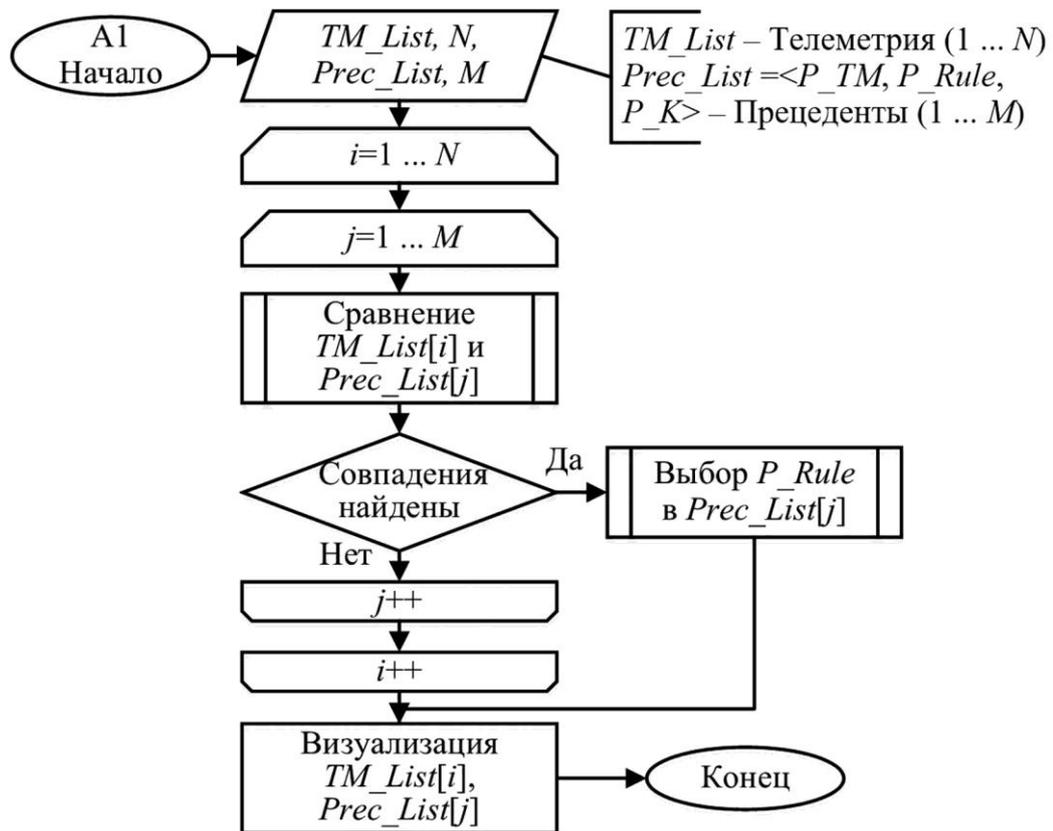


Рисунок 12 – Алгоритм анализа испытаний по базе прецедентов

Алгоритм выполняет поиск параметров телеметрии для прецедентов в  $P\_TM$  и их сравнение с телеметрией объекта контроля в  $TM\_List$ . Результатом работы алгоритма являются прецеденты модели, соответствующие телеметрии бортовых систем, и выполненные правила базы знаний. В случае, если выполняется приём и передача команд, то поиск по базе прецедентов может быть ограничен результатами моделирования, полученными при отработке заданной команды.

Предложенные методы поддержки испытаний командно-программного управления позволяют проводить анализ характеристик исследуемых объектов на программных моделях, формировать на основе моделей испытательные процедуры для реального оборудования и выполнять контроль результатов испытаний. Применение экспертных знаний, заложенных в имитационной модели, позволяет применять инструменты подготовки и анализа испытаний при различных вариантах использования и режимах функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

В главе 3 представлены результаты реализации методов построения и применения имитационных моделей функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Представлено программное обеспечение ПММ БА

КИС – «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата», которое позволяет выполнять графическое и имитационное моделирование логики функционирования командно-измерительной системы космического аппарата (Рисунок 13).

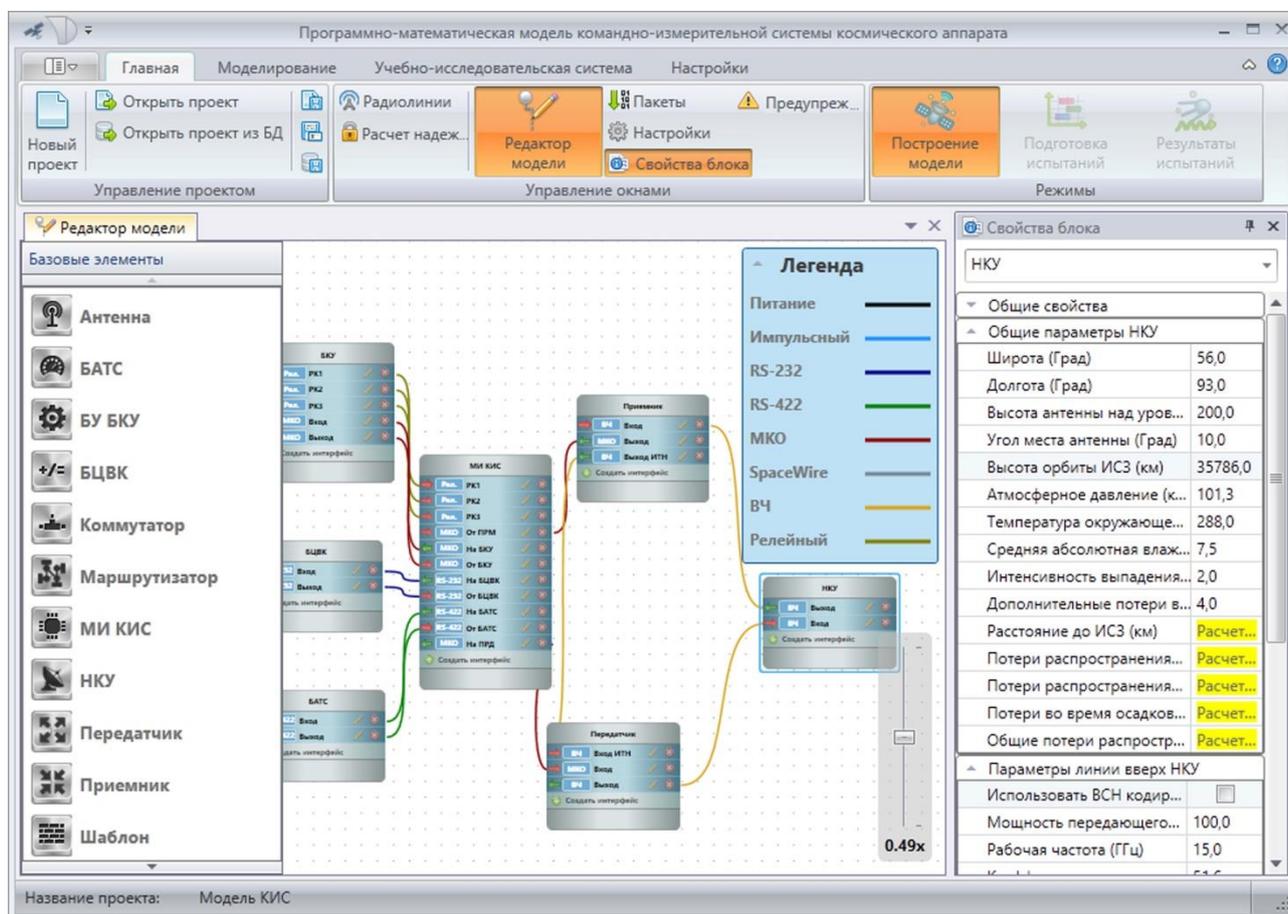


Рисунок 13 – Инструменты информационно-графического моделирования

Программное обеспечение позволяет создавать конфигурацию бортовых систем, задавать резервирование элементов модели, определять коммутационные интерфейсы, вводить характеристики и параметры функционирования оборудования.

Для формирования функционального описания модели представлены инструменты «Редактор пакетов данных» (Рисунок 14) и «Редактор правил» (Рисунок 15). Программное обеспечение предоставляет удобные визуальные инструменты для формирования произвольных структур пакетов команд и телеметрической информации и их наполнения данными. Обеспечивается унификация структур данных, применяемых для имитационного моделирования и для проведения испытаний.

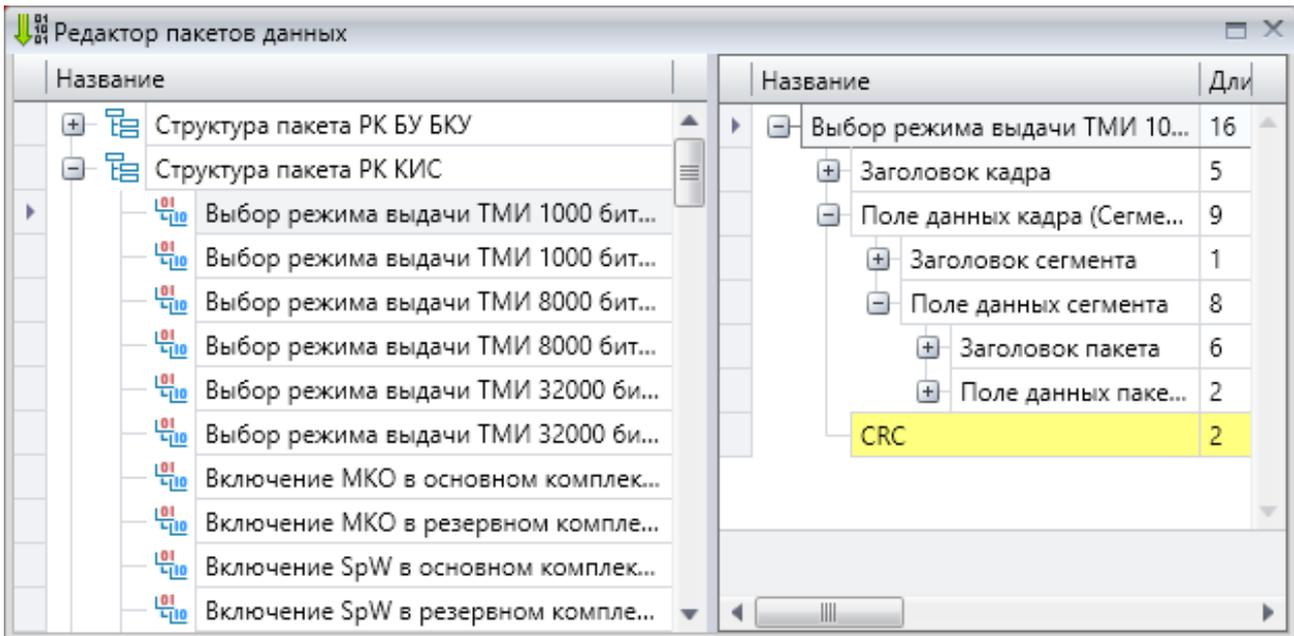


Рисунок 14 – Редактор пакетов данных

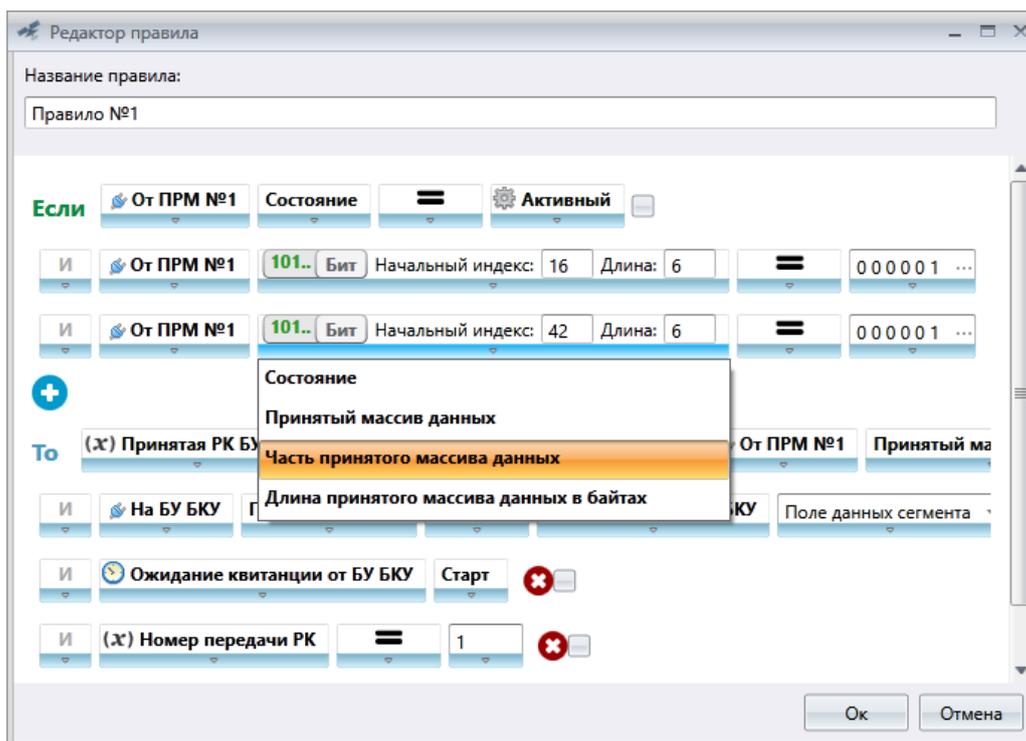


Рисунок 15 – Редактор правил функционирования модели

Разработан редактор правил для создания и ведения баз знаний. В левой части правила в качестве условия указывается ожидаемое состояние одного из входных интерфейсов элемента модели или его таймера, при возникновении которого правило должно выполниться. В правой – задается передача данных на один из исходящих интерфейсов элемента модели, перевод таймера в задан-

ное состояние или изменение значения переменной. Поддерживается синтаксический контроль базы знаний.

Для анализа построенной модели применяются инструменты интерактивной инфографики. Пример анализа структуры модели и функциональных связей, заданных в базе знаний, показан на рисунках (Рисунок 16, Рисунок 17).

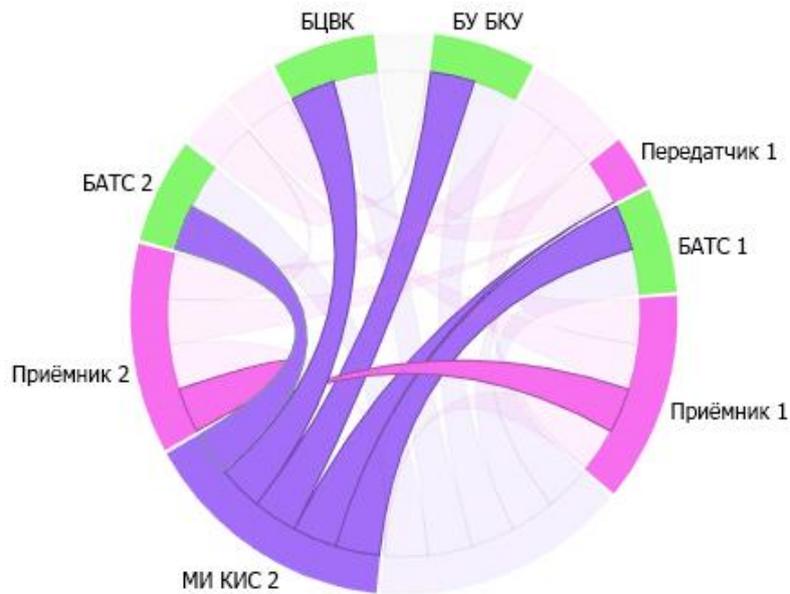


Рисунок 16 – Диаграмма функциональных зависимостей

Описание ошибки			
<b>МИ КИС 2</b>	От БАТС 1	БАТС	Выход
Для передающего интерфейса описано правило приёма		Принимающий интерфейс указан передающим Для принимающего интерфейса нет правил.	
<b>МИ КИС 1</b>	На БЦВК	БЦВК	Вход
Для передающего интерфейса нет правил		Для принимающего интерфейса нет правил.	
<b>МИ КИС 1</b>	На БУ БКУ 2	БУ БКУ	Вход 2
		Для принимающего интерфейса описано правил передачи.	

Рисунок 17 – Анализ функциональных зависимостей

Программное обеспечение визуализирует зависимости между элементами модели, заданные в её структуре, или в базе знаний, и формирует список обнаруженных ошибок.

В главе 3 показана эффективность методов построения моделей функционирования бортовой аппаратуры. Реализация методов обеспечивает удобные инструменты для построения графических конфигураций моделей, задания логики функционирования; поддерживает работу со специализированными типами данных (структуры и пакеты телекоманд и телеметрической информации);

обеспечивает расширяемость модели путём интеграции с виртуальными приборами и пр. За счет интеграции методов проектирования моделей, формирования правил на основе программ испытаний, а также применения шаблонов, описывающих режимы функционирования бортовой аппаратуры, достигнуто существенное сокращение трудозатрат на создание имитационных моделей.

В главе 4 представлены результаты реализации технологии поддержки испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Результатом реализации стало программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры (ПО КПА КИС), входящее в состав испытательного программно-аппаратного комплекса, предназначенное для формирования и выполнения сценариев испытаний. Программное обеспечение объединяет информационные, измерительные, вычислительные и имитационные ресурсы для проведения широкого спектра экспериментальных исследований.

Реализованы визуальные графические инструменты для построения сценариев испытаний (Рисунок 18).

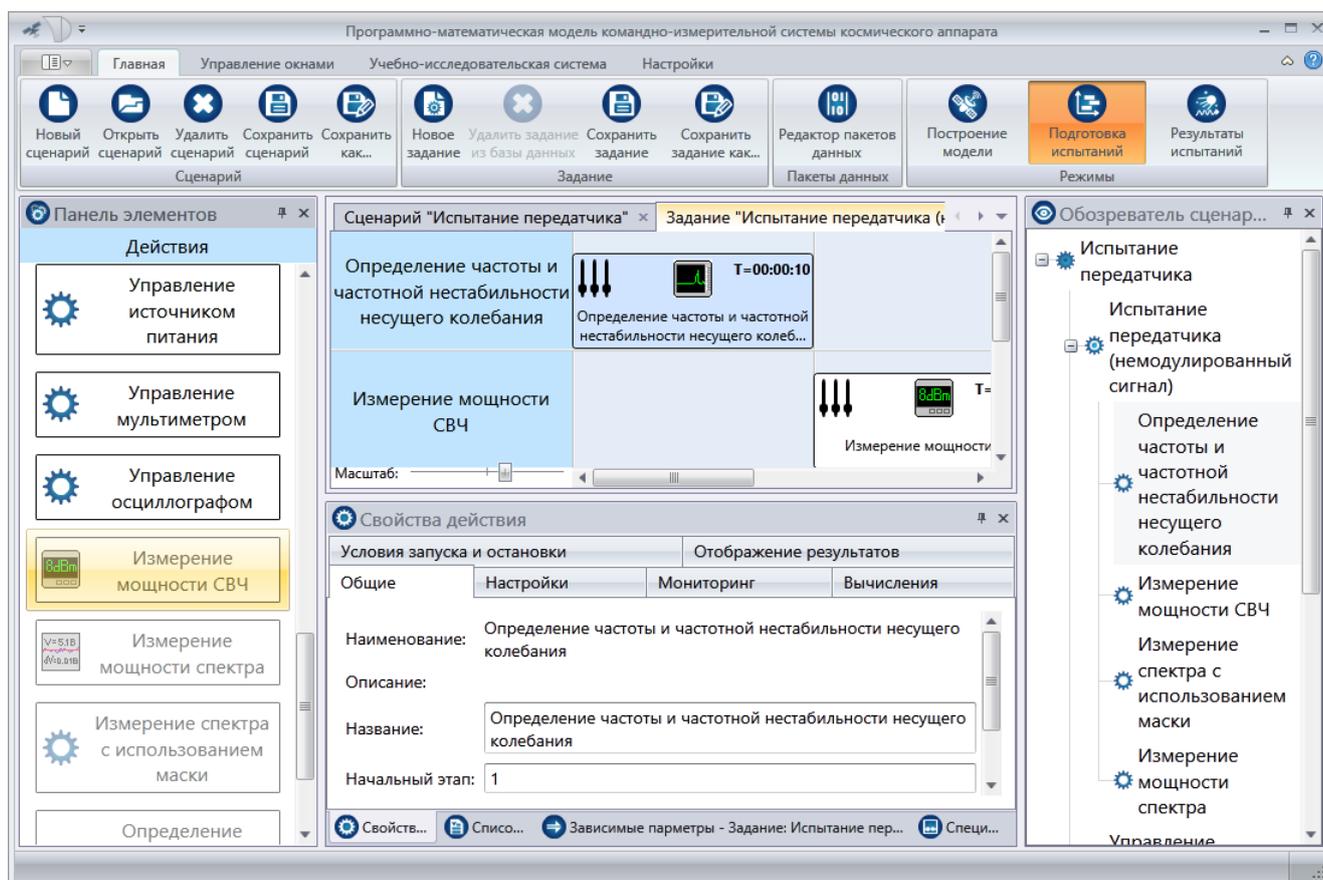


Рисунок 18 – Подсистема формирования сценариев испытаний

Поддерживается поэтапное построение сценария, на начальном этапе из действий строятся задания и определяются необходимые параметры. На следу-

ющем этапе из заданий собирается сценарий. К действиям подключаются виртуальные инструменты, реализующие взаимодействие испытательного оборудования КПА с объектом контроля.

Выполнение сценария испытаний начинается с самопроверки оборудования. Далее анализируется порядок выполнения действий в сценарии, формируются входные данные и передаются в виртуальные инструменты. Поступающие от оборудования результаты испытаний визуализируются (Рисунок 19). Способы отображения данных задаются при построении сценариев и могут быть изменены в процессе испытаний. Ведется журнал событий. Выполняется контроль данных на заданные граничные условия, анализ и визуализация телеметрической информации, поступающей от объекта контроля.

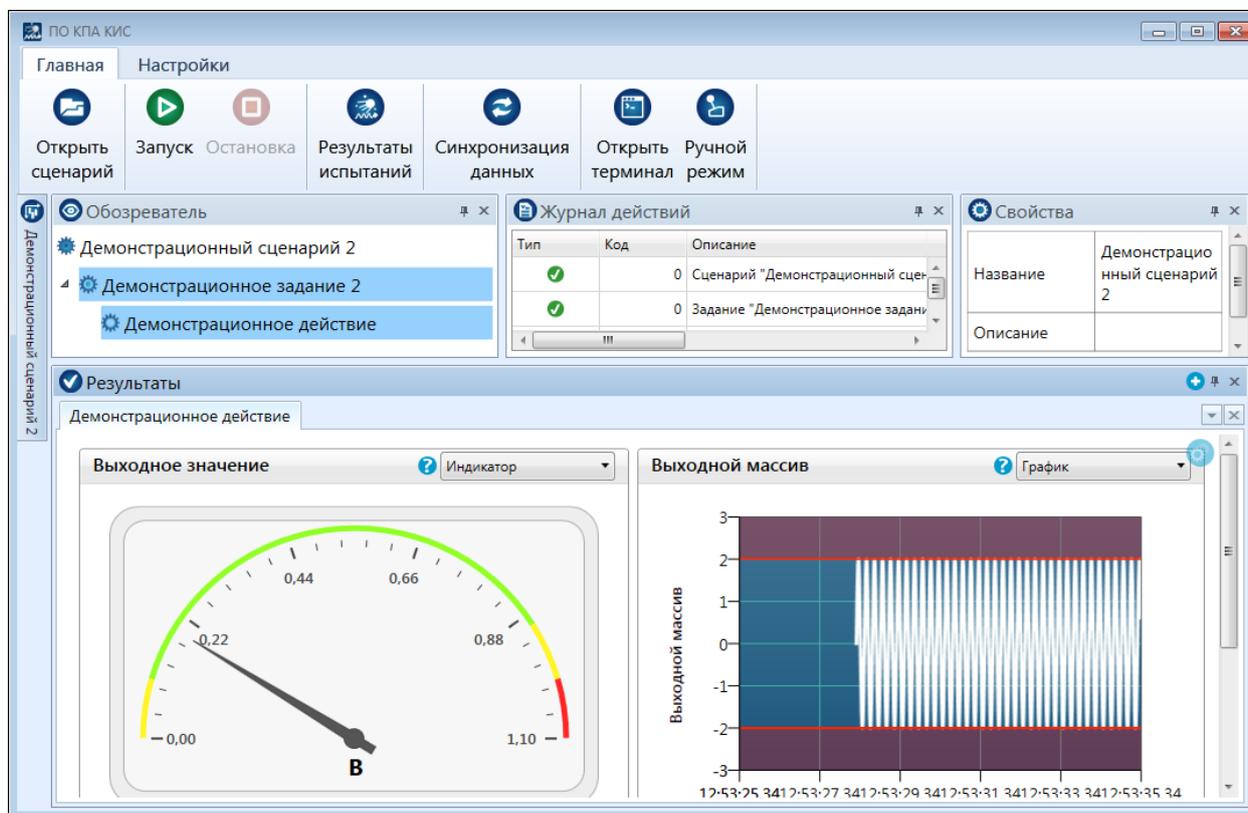


Рисунок 19 – Отображение результатов испытаний

Для подготовки испытаний командно-программного управления применяется метод генерации испытательных процедур (Рисунок 20). Программное обеспечение работает следующим образом: выбранная команда передается в программное обеспечение имитационного моделирования. Строятся цепочки логического вывода, из полученных правил выбираются параметры настройки передачи команд и критерии контроля их выполнения. Полученные параметры подставляются в испытательные процедуры.

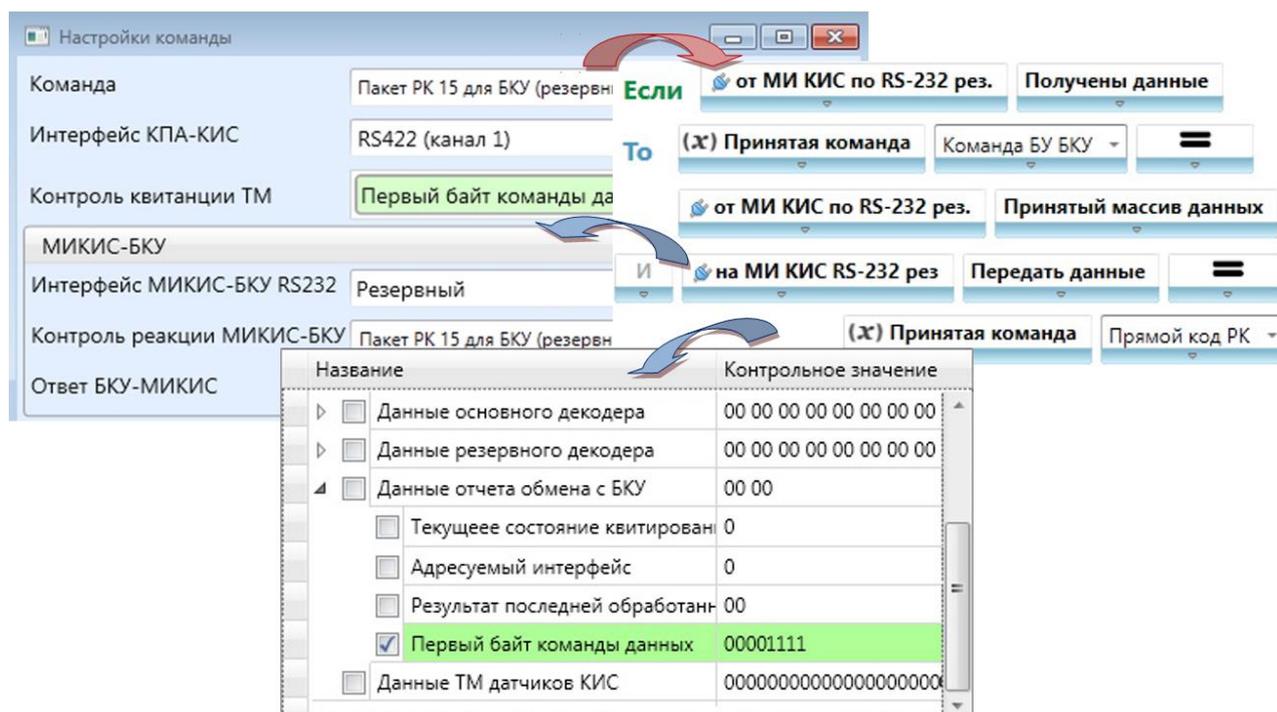


Рисунок 20 – Метод генерации испытательных процедур

Построенные испытательные процедуры передаются для выполнения в программно-аппаратный комплекс контрольно-проверочной аппаратуры. Ход выполнения испытаний визуализируется (Рисунок 21).

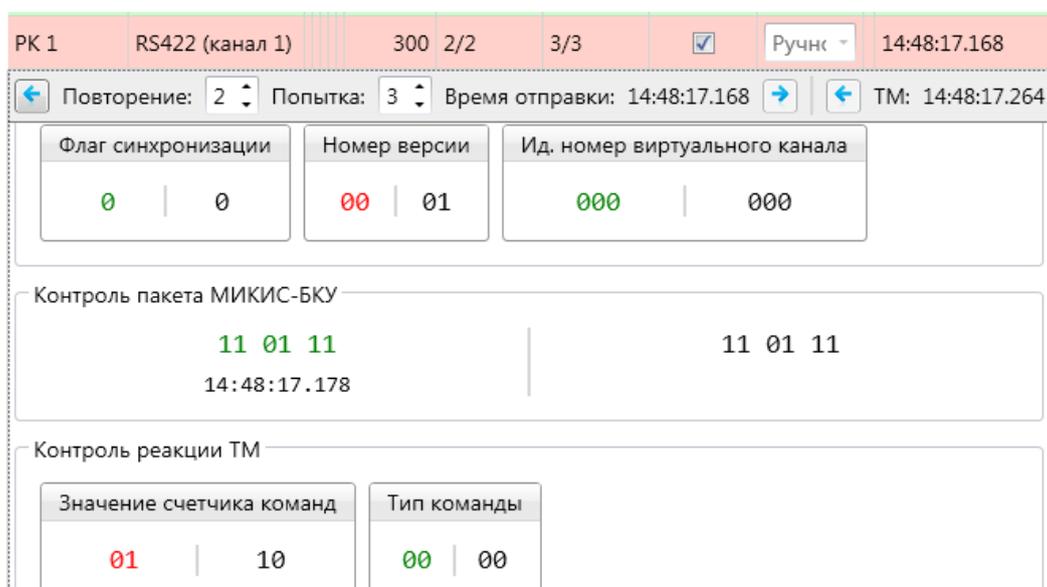


Рисунок 21 – Детализация анализа передачи команды

Программное обеспечение отображает настройки испытания, время отправки команды и получения реакции в телеметрии, а также заданные контролируемые значения с результатами. В случае, если процедуры командно-

программного управления являются частью сценария проведения испытаний, то порядок их выполнения определяется структурой такого сценария.

Для анализа результатов испытаний выполняется поиск параметров телеметрии и их сравнение с телеметрией объекта контроля. Программное окно с результатами анализа показано на рисунке (Рисунок 22).

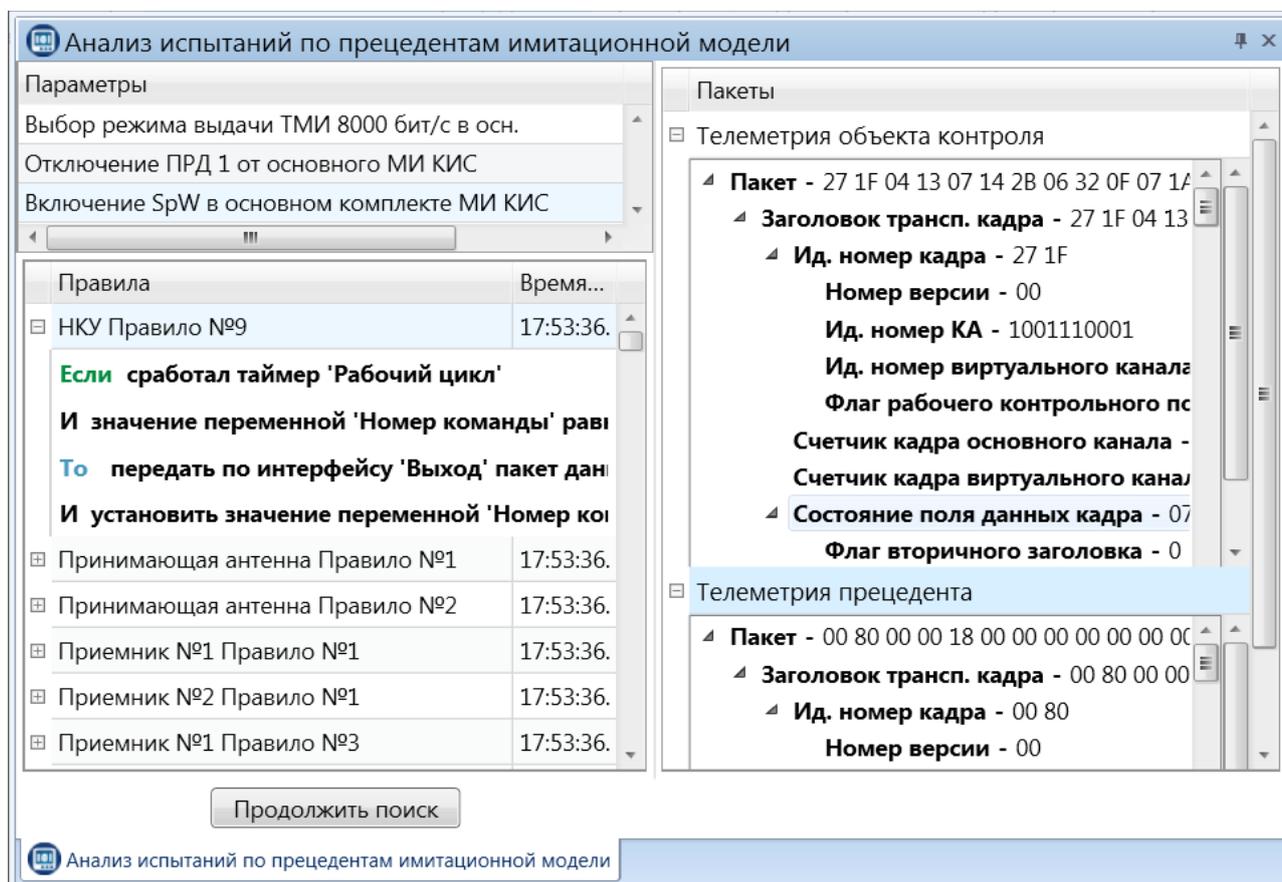


Рисунок 22 – Сравнение телеметрии испытаний и базы прецедентов

При совпадении значений параметров телеметрии, отображаются правила, описывающие действия имитационной модели, которые предшествовали получению телеметрии с соответствующими параметрами. Сравнение телеметрии прецедентов имитационного моделирования с результатами испытаний бортовой аппаратуры позволяет выявлять особенности функционирования, которые могли остаться не замеченными при других методах анализа.

В главе 4 выполнен анализ эффективности применения новой технологии для подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Программное обеспечение обладает следующими качественными характеристиками, определяющими его эффективность: наличие удобных инструментов для описания методики испытаний и их декомпозиции; поддержка механизмов повторного использования

элементов сценария; преимущество данных от имитационных моделей; расширяемость путём интеграции с виртуальными приборами; настраиваемые графические интерфейсы для визуализации результатов; ведение архивов результатов и др.

Для оценки эффективности предложенной технологии проведено сравнение среднего времени выполнения отдельных функций конструктора бортовой аппаратуры методом прямого описания и инструментами, входящими в разработанную технологию. График времени выполнения задач подготовки испытаний показан на рисунке (Рисунок 23).

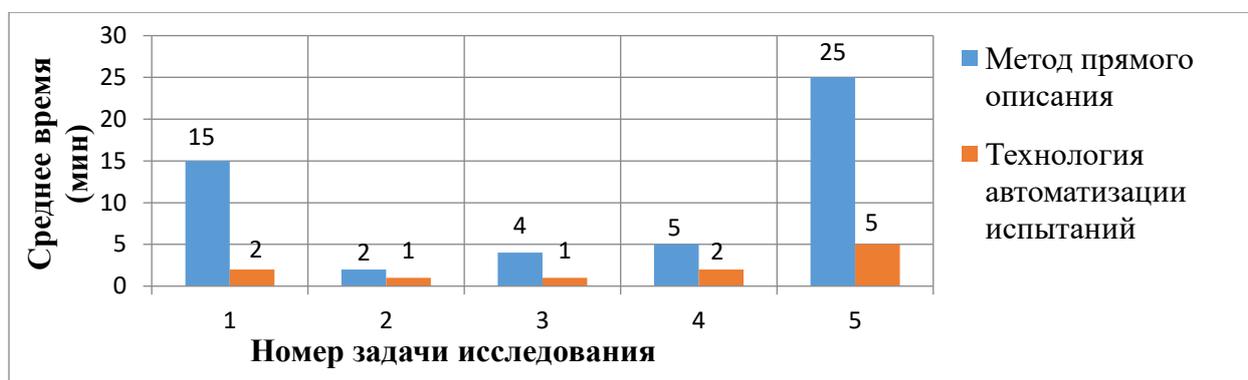


Рисунок 23 – Диаграмма времени выполнения задач подготовки испытаний

Рассмотрены типовые задачи подготовки испытаний: (1) создание структуры телеметрии, (2) введение команды РК<sub>КИС</sub>, (3) введение команды РК<sub>БКУ</sub>, (4) создание испытательных процедур, (5) выбор параметров контроля телеметрии. Выполнена оценка среднего времени, потраченного на решение задачи методом прямого описания и с применением технологии автоматизации испытаний. Сокращение трудозатрат и времени решения конструкторских задач составляет в среднем в 2–5 раз.

Таким образом, применение новой технологии обеспечивает эффективную поддержку проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры, повышает качество и обоснованность конструкторских решений.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования, отмечены перспективы развития и практического применения результатов, представленных в работе.

В **приложениях** приведены копии актов о внедрении результатов диссертационной работы и программного обеспечения в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» и ФГАУ ВО «Сибирский федеральный университет» и копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах их перечня ВАК РФ

1. **Исаева О.С.**, Ноженкова Л.Ф., Колдырев А.Ю. Интеллектуальный анализ испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии, 2019. Т. 24, № 3., С. 59–74. doi: 10.25743/ICT.2019.24.3.005.
2. **Исаева О.С.** Системный подход к автоматизации испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата // Автоматизация. Современные технологии. Т. 73, № 5. 2019. С. 229-234.
3. **Исаева О.С.**, Колдырев А.Ю. Алгоритмы анализа испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1(59). – С. 46-57. doi:10.22250/isu.2019.59.46-57.
4. **Исаева О.С.** Технология построения комплексных моделей в инфраструктуре имитационного моделирования // Информационные технологии, №7, Том 24, 2018, С. 474–480. doi: 10.17587/it.24.474-480.
5. **Исаева О.С.** Разработка методики автоматизации испытаний на основе имитационной модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вестник компьютерных и информационных технологий, №10(172), 2018, С. 30-38. doi: 10.14489/vkit.2018.10. pp.030-038.
6. **Исаева О.С.** Проектирование метода формирования испытаний бортового оборудования космического аппарата с использованием базы знаний // Информатизация и связь, №5, 2018, С. 62-67.
7. **Исаева О. С.** Технология проектирования инфраструктуры имитационного моделирования на основе методологии SCRUM // Информатизация и связь, 2017, № 4, С. 250-256.
8. Nozhenkova L. F., **Isaeva O. S.**, Koldyrev A. Yu. Organization of complex testing of the spacecraft command and measuring system // Siberian Journal of Science and Technology, 2018, Vol. 19, No. 3, P. 510–516. doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-510-516.
9. Ноженкова Л.Ф., **Исаева О.С.**, Евсюков А.А. Разработка проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования // Автоматизация. Современные технологии, Т. 72, № 7, 2018, С. 320–323.
10. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Вогоровский Р. В. Автоматизация испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2017., Т. 71, № 4. С. 184-188.

11. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.** Метод проблемно-ориентированной интеграции имитационных моделей // Информатизация и связь, 2017, № 4, С. 124-128.
12. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.** Проектирование предметно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 538–544.
13. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Марков А. А. Реализация технологии повторного использования имитационных моделей в инфраструктуре моделирования // Фундаментальные исследования, 2017, №11-1, С 103-107.
14. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Вогоровский Р. В., Грузенко Е. А. Программная поддержка испытаний приема-передачи команд и анализа телеметрии в командно-измерительной системе // Вестник СибГАУ. 2016, Том 17, № 4. С. 997–1004.
15. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Грузенко Е. А., Белорусов А. И. Компоненты унификации модели бортовой аппаратуры космического аппарата // Современные наукоемкие технологии. 2016, № 11-2. С. 284-288.
16. **Исаева О. С.**, Грузенко Е. А., Вогоровский Р. В., Колдырев А. Ю. Моделирование и анализ функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Информатизация и связь. № 1, 2015, С. 58-64.
17. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Грузенко Е. А. Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии, Том 20, № 3, 2015 стр. 33-44.
18. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Грузенко Е. А., Вогоровский Р. В., Колдырев А. Ю., Евсюков А. А. Комплексная поддержка конструирования бортовых систем контроля и управления космических аппаратов на основе интеллектуальной имитационной модели // Информационные технологии. № 9, 2015, С. 706-714.
19. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Грузенко Е. А. Построение программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Информатизация и связь. – 2014. – Выпуск 1. – С. 87-93.
20. Ноженкова Л. Ф., **Исаева О. С.**, Грузенко Е. А. Проектирование и разработка программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Вестник СибГАУ. Выпуск 2(54). – 2014. – С. 114-119.

**Публикации в изданиях, индексируемые в Scopus, Web of Science:**

21. **Isaeva O.S.**, Koldyrev A.Yu., Chernigovskiy A.S., Mishurov A.V., Kamyshnikov A. N., Evstratko V. V. Automated support for spacecraft onboard equipment design on the basis of a heterogeneous model // *Journal of Physics: Conference Series*, V. 1353, N. 1, 2019, pp. 012011, doi:10.1088/1742-6596/1353/1/012011.
22. **Isaeva O.**, Nozhenkova L. Spacecraft onboard equipment testing automation technology on the basis of simulation model // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. pp. 1-6, doi:10.1088/1757-899X/537/3/032067.
23. Kulyasov N., **Isaeva O.**, Isaev S. Method of creation and verification of the spacecraft onboard equipment operation model // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. pp. 1-6. doi:10.1088/1757-899X/537/2/022042.
24. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S. Evsyukov A.A. Tools of computer modeling of the space systems' onboard equipment functioning // *SPIIRAS Proceedings*. 2018. Vol. 1, Iss. 56, pp. 144-168. doi: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.56.7>.
25. Nozhenkova L., **Isaeva O.**, Koldyrev A.Yu. Creation of the base of a simulation model's precedents for analysis of the spacecraft onboard equipment testing results // *Advances in Intelligent Systems Research*, Vol. 151, 2018, pp. 78-81, doi:10.2991/cmsa-18.2018.18.
26. Nozhenkova L., **Isaeva O.**, Vogorovskiy R. Command and Software Management Simulation for the Spacecraft Equipment Testing // *3<sup>rd</sup> Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications*. NY: IEEE, 2018, pp 1-4, doi: 10.1109/RPC.2018.8482182.
27. Nozhenkova L., **Isaeva O.**, Gruzenko E., Markov A. Problem-oriented integration of SMP-models in the simulation modeling infrastructure // *Advances in Intelligent Systems Research*, Vol. 141, 2017, pp. 121-124. doi:10.2991/ammsa-17.2017.26.
28. Nozhenkova L., **Isaeva O.**, Gruzenko E. Architecture of the simulation modeling infrastructure based on the simulation model portability standard // *Advances in Intelligent Systems Research*, Vol. 141, 2017, pp. 125-128. doi: 10.2991/ammsa-17.2017.27.
29. Nozhenkova L., **Isaeva O.**, Markov A., Koldyrev A., Vogorovskiy R., Evsyukov A. Simulation infrastructure design on the basis of the space industry's international standards // *Advances in Intelligent Systems Research*, Vol. 134, 2017, pp. 138-141. doi: 10.2991/caai-17.2017.28.
30. Nozhenkova L. F., **Isaeva O. S.**, Vogorovskiy R. V. Command and software control simulation for testing spacecraft onboard equipment // *DEStech Transactions on engineering and technology research*, 2016, pp. 349-353, doi:10.12783/dtetr/amita2016/3694.

31. Nozhenkova L.F., **Isaeva O. S.**, Gruzenko E. A., Koldyrev A. Yu, Markov A. A., Belorusov A. I., Vogorovskiy R. V. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the «Simulation Model Portability» standard // *Advances in Intelligent Systems Research*, Vol. 133, 2016, pp. 481-484, doi:10.2991/aiie-16.2016.111.

32. Nozhenkova L. F., **Isaeva O. S.**, Gruzenko E. A., Koldyrev A. Yu. Integration technology of the onboard equipment simulation models in simulation modeling infrastructure // *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, 2016, pp. 618-622, doi:10.12783/dtetr/iceea2016/6728.

33. Nozhenkova L. F., **Isaeva O. S.**, Vogorovskiy R. V. Automation of spacecraft onboard equipment testing // *AER-Advances in Engineering Research*, Vol. 52, 2016, pp. 215-217, doi: 10.2991/amsee-16.2016.57.

34. Nozhenkova L., **Isaeva O.**, Gruzenko E. Computer simulation of spacecraft onboard equipment // *ACSR-Advances in Computer Science Research*, Vol. 18, 2015, pp. 943-945, doi: 10.2991/cisia-15.2015.255.

#### **Свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ:**

35. Ноженкова Л.Ф., **Исаева О.С.**, Марков А.А. и др. Программное ядро инфраструктуры имитационного моделирования. Свидетельство об официальной регистрации в Реестре программ для ЭВМ №2018610037 от 09.01.2018 г. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2018.

36. Ноженкова Л.Ф., **Исаева О.С.**, Вогоровский Р.В., Мишуров А.В. Редактор формирования процедур внешнего командно-программного управления для испытаний командно-измерительной системы космического аппарата. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662761 от 16.11.2017 г. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2017.

37. Рябушкин С.А., Ноженкова Л.Ф., Сухотин В.В., **Исаева О.С.** и др. Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата (ПММ БА КИС). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661981 от 13.11.2015 г. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2015.

38. Ноженкова Л.Ф., **Исаева О.С.**, Грузенко Е.А. и др. Инструментальная среда имитационного моделирования программно-технических комплексов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014617786. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2014.

39. Ноженкова Л.Ф., **Исаева О.С.**, Грузенко Е.А., Вогоровский Р.В. Инструменты графического моделирования программно-технических комплексов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014617411 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2014.

40. Рябушкин С.А., Ноженкова Л.Ф., Сухотин В.В., **Исаева О.С.** и др. Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата (ПО КПА КИС). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662250 от 26.11.2014 г. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2014.

---

Подписано в печать

\_\_\_. \_\_\_. 2020

Формат 60×84<sub>1/16</sub>

Печать цифровая.

Объем 2 п.л.

Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в Институте вычислительного моделирования СО РАН –

обособленном подразделении ФИЦ КИЦ СО РАН

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение 44