На правах рукописи

Исаева Ольга Сергеевна

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Красноярск – 2022

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор **Ноженкова Людмила Фёдоровна**

Официальные оппоненты:

Легалов Александр Иванович
доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», департамент программной инженерии факультета компьютерных наук, профессор

Массель Людмила Васильевна
доктор технических наук, профессор, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, отдел Систем искусственного интеллекта в энергетике, заведующий отделом

Миронов Андрей Николаевич
доктор технических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, отдел проблем эксплуатации ракетно-космической техники и объектов инфраструктуры, кафедра «Конструкция ракетносителей и двигателей», профессор

Ведущая организация: Институт проблем управления сложными системами РАН – обособленное подразделение ФИЦ СамНЦ РАН

Защита состоится «18» февраля 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва» по адресу: 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты Красноярский рабочий, 31.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современные тенденции развития наукоёмкого производства космических аппаратов позиционируются как переход от традиционной парадигмы проектирования, связанной с доводкой изделий до требуемых характеристик на основе дорогостоящих многократных натурных испытаний и итерационного перепроектирования, к новой парадигме цифрового проектирования и моделирования – технологии разработки и применения «цифровых двойников» (Digital Twin), «обеспечивающей, как правило, прохождение с первого раза физических и натурных испытаний, определение критических зон и критических характеристик для мониторинга на всех этапах жизненного цикла изделия»[1]. В основе понятия цифровых двойников, предложенного Grieves M. и получившего развитие в работах Vickers J., Glaessgen E., Stargel D., Боровкова А.И. лежит интеграция данных о физическом объекте или процессе, а также методов их получения, преобразования и применения для повышения эффективности производства. В аэрокосмической отрасли концепция цифровых двойников только развивается, несмотря на отмечаемую в работах Микрина Е.А., Кульбы В.В., Воробьева А., Елубаева С.А., Зеленцова В.А., Соколова Б.В, Eickhoff J., Strzepek A., Guo J., Zeigler B.P. и др. необходимость создания единых информационных и функциональных подходов к поддержке разработки космических систем.

Производство бортовой аппаратуры космических аппаратов – наукоёмкий и дорогостоящий процесс, связанный с множеством разнообразных, в том числе, слабо формализуемых факторов, возникающих при проектировании и анализе функционирования изготовляемого оборудования. Концепция цифровых двойников позволяет рассматривать этот процесс как интеграцию базовых элементов: моделей для описания характеристик и принципов функционирования элементов бортовой аппаратуры, проблемно-ориентированных баз знаний, а также данных, получаемых на основе оценки состояния изготавливаемого оборудования. Моделирование осуществляется с помощью универсальных языков программирования, языков имитационного моделирования, имитационных систем и предметно-ориентированных систем. Среди унифицированных подходов выделяется направление, связанное с построением инфраструктур имитационного моделирования, обеспечивающих на основе международных стандартов ESA (European Space Agency – Европейское космическое агентство) стандартизацию моделей и их интеграцию на единой технологической платформе. Ин-

[1] «Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf

фраструктуры применяются с уровня конструкторского бюро 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 C., Cheol-Hea K. и др. Проблемно-ориентированные базы знаний и онтологии применяются для моделирования и анализа бортовых систем в работах Лахина О.И., Миронова А.Н., Скобелева П.О., Тюгашева А.А., Eito-Brun R., Hennig C. и др. Передовой опыт онтологического моделирования для построения цифровых двойников производственных процессов критических областей деятельности представлен в работах: Массель Л.В., Массель А.Г. и др. Получение, накопление и применение данных о состоянии реальных объектов выполняется методами поддержки испытаний технических систем на основе универсальных испытательных комплексов или специализированных инструментов управления технологическими процессами испытаний. Универсальные подходы описаны в работах Перцовского М.И., Ртищева А.В., Чуранова С.А., Голышевой О.С., Дунаева А.В. Специализированные методы, обеспечивающие имитацию и анализ работы бортовых систем при штатных и нештатных условиях, возникновении аварийных ситуаций, отказе резервируемых систем и каналов связи, представлены в работах Бровкина А.Г., Бурдыгова Б.Г., Гордийко С.В., Везенова В.И., Светникова О.Г., Туркина И., Лучшева П. и др. Для реализации концепции цифровых двойников необходимо расширение возможностей имитаторов бортовых систем за счёт интеграции отраслевых баз знаний с программно-математическими моделями и данными натурных испытаний. Построенные модели должны входить в программно-аппаратный комплекс контрольно-проверочной аппаратуры и обеспечивать построение и контроль испытаний на основе баз знаний, выполнять имитацию систем окружения и проводить анализ функционирования бортовых систем по прецедентам имитационного моделирования. Диссертационная работа посвящена созданию научно обоснованных технологических решений, реализация которых вносит значительный вклад в развитие страны и обеспечивает построение и применение базовых компонент цифровых двойников на основе интеллектуальных имитационных моделей для повышения эффективности процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов.

Диссертационное исследование выполнено в рамках научных программ РАН, грантов и научно-исследовательских работ, в их числе: 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»; 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»; НИОКР «Модернизация и внедрение подсистемы приёма-передачи команд в ПО для проведения автономных испытаний КИС КА. Внедрение на рабочих местах конструкторов средств удалённой работы с ПО подготовки и анализа испытаний КИС КА» Договор № 4016/16 от 11.10.2016 г.; НИОКР «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.; 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.); 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.); поддержано Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2021-1384).

Объект исследования – бортовые системы космических аппаратов.

Предмет исследования – методы поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры за счёт создания технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников.

Поставленная цель достигается путём решения следующих **задач**:

1. Анализ системной проблемы поддержки процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников;

2. Формирование интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовых систем как базового понятия новой технологии, обеспечивающей построение и применение цифровых двойников, объединяющих базы знаний, виртуальные инструменты и результаты натурных испытаний для моделирования и исследования технических характеристик и методов работы бортовых систем космических аппаратов;

3. Разработка методов построения интеллектуальных имитационных моделей бортовых систем, объединяющих базовые компоненты цифровых двойников и позволяющих формализовать и применять знания специалистов предметной области для исследования проектных решений;

4. Разработка методов анализа функционирования бортовых систем, позволяющие применять интеллектуальные имитационные модели для подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов;

5. Разработка методов поддержки испытаний командно-программного управления космическим аппаратом, использующие интеллектуальные имитационные модели для подготовки испытательных процедур и анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования;

6. Разработка технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем, обеспечивающей построение и применение цифровых двойников для поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов;

7. Проектирование проблемно-ориентированных систем, позволяющих применять технологию интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры для поддержки принятия решений в технических системах в космической отрасли.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с пунктами паспорта специальности «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. 9 «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов», п. 10 «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

Методы исследования, использованные в работе, основываются на методологии системного анализа, методологии структурного анализа и проектирования (SADT) сложных объектов исследования, методологии инженерии знаний, интеллектуального имитационного моделирования, концепции цифровой трансформации и цифровых двойников, теории реляционных баз данных, методологических и технологических подходах, представленных в научных трудах отечественных и зарубежных учёных в области компьютерной поддержки проектирования, изготовления и анализа функционирования сложных технических систем.

Новые научные результаты

1. Предложена формализация понятия интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовой системы, впервые позволившая обеспечить применение формального подхода к созданию цифровых двойников: объединить базы знаний, виртуальные инструменты (программно-математические модели технических систем) и результаты натурных испытаний на основе единого семантического представления элементов бортовой аппаратуры.

2. Разработаны методы построения интеллектуальных имитационных моделей, которые обеспечивают интеграцию базовых компонент цифровых двойников для поддержки проектирования бортовых систем космических аппаратов. Новые методы выполняют поддержку построения моделей методами эвристического поиска, формирование баз знаний на основе программ испытаний, структурно-графическое исследование моделей и анализ качества моделирования по результатам испытаний бортовой аппаратуры.

3. Предложены новые методы анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов, которые поддерживают применение цифровых двойников на каждом шаге подготовки и проведения испытаний: для построения сценариев испытаний, анализа полноты испытаний логики работы бортовых систем, в качестве имитаторов в процессе проведения испытаний, а также для анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования.

4. Впервые предложена технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем, обеспечивающая повышение эффективности процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов за счёт интеграции интеллектуальных, информационных и графических методов построения и применения цифровых двойников.

5. Разработаны проблемно-ориентированные системы, обеспечивающие применение предложенной технологии для поддержки научно-производственных процессов. Системы позволяют решать новые функциональные задачи: формирование баз знаний; построение интеллектуальных моделей функционирования бортовых систем, их интеграцию с программно-математическими моделями технических устройств; накопление и анализ результатов натурных испытаний.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная формализация понятия интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовой системы обеспечивает применение формального подхода к созданию цифровых двойников, объединяет проблемно-ориентированные базы знаний, программно-математические модели бортовых систем и данные натурных испытаний на основе единого семантического представления элементов бортовой аппаратуры.

2. Разработанные методы построения интеллектуальных имитационных моделей обеспечивают интеграцию баз знаний и методов функционирования реального оборудования для поддержки проектирования бортовых систем космических аппаратов.

3. Разработанные методы анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов обеспечивают применение цифровых двойников на каждом шаге подготовки и проведения испытаний.

4. Созданная технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем позволяет повысить эффективность процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов за счёт интеграции интеллектуальных, информационных и графических методов на основе концепции цифровых двойников.

5. Разработанные проблемно-ориентированные системы позволяют решать новые функциональные задачи: формирование отраслевых баз знаний; построение интеллектуальных моделей функционирования бортовых систем, их интеграцию с программно-математическими моделями технических устройств; накопление и анализ результатов натурных испытаний.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в создании новых научно-обоснованных технологических решений на основе комплекса интеллектуальных методов имитационного моделирования и анализа функционирования сложных технических систем, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие кос-

мической отрасли страны, обеспечивая интеллектуальную поддержку высокотехнологичного производства бортовых систем космических аппаратов.

Практическим результатом диссертационной работы является программная реализация и апробация проблемно-ориентированных систем интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры для поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов – «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). Внедрение предложенной в диссертационном исследовании технологии и проблемно-ориентированных систем выполнено в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» при организации производства бортовой аппаратуры командно-измерительных систем космических аппаратов и Сибирском федеральном университете, что подтверждено соответствующими актами и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов подтверждаются: 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 результаты, выносимые на защиту, получены 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 под руководством автора. Аппаратное обеспечение испытательного комплекса контрольно-проверочной аппаратуры, библиотеки виртуальных инструментов реализованы специалистами Сибирского федерального университета.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационного исследования были представлены на международных и всероссийских научных

конференциях, в числе: XVIII Международная научная конференция, посвящённая 90-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва «Решетнёвские 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.), 2nd 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.), 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.), 2nd International conference on control, automation and artificial intelligence (Sanya, China, 2017 г.), 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 г.), VII Международный семинар «Критические инфраструктуры в цифровом мире» (Иркутск, 2020 г.), 1st Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications (Krasnoyarsk, 2020 г.).

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

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 65 работ, в том числе 21 – в рецензируемых российских журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 18 – индексируемых в Scopus, Web of Science, 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 18 статей в рецензируемых изданиях и материалах научных конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 360 наименований, списка сокращений и 2-х приложений. Полный объём работы составляет 315 страниц, включая 88 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведены результаты анализа системной проблемы повышения эффективности поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов и показана необходимость поддержки цифровой трансформации, обеспечивающей перенос итерационных процессов проектирования бортовых систем и выполнения дорогостоящих натурных испытаний на цифровые модели. Рассмотрен объект исследования – бортовые системы космических аппаратов, которые 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 и др. Управление космическим аппаратом выполняется на основе командно-программного метода и представляет совокупность операций оценки состояния движения и аппаратуры космического аппарата, принятия решений, выработки управляющих воздействий и их передачи на космический аппарат. Конструктору бортовой аппаратуры необходимо проектировать основные принципы взаимодействия бортовых систем между собой и с наземными системами в соответствии с различным назначением и условиями эксплуатации, а также анализировать как проектные решения, так и работу изготавливаемого оборудования. Бортовые системы относятся к классу сложных технических систем и для их моделирования требуется интеграция моделей, основанных на представлении знаний специалистов предметной области, моделей, описывающих их технические характеристики, и результатов натурных испытаний. Интегратором разнородных моделей и данных о физических объектах, а также методов их получения, преобразования и применения для повышения эффективности производства выступает концепция цифровых двойников.

Построение цифровых двойников выполняется на основе различных технологий моделирования и подходов к сбору и накоплению информации о поведении сложных технических систем. Выполнен обзор существующих методов построения моделей, сбора аналитики по испытаниям реальных устройств и создания баз знаний, отражающих отраслевые особенности производства бортовых систем космических аппаратов. Сложность задачи, затрудняющая применение рассмотренных подходов, заключается в необходимости проектировать и исследовать поведение бортовых систем, учитывая множества связей, режимов работы и команд управления при отсутствии универсальных проектных решений, унифицированных протоколов информационного взаимодействия и высокой стоимости экспериментальных испытаний. Существующего уровня цифровизации производства недостаточно в случае, когда требуется анализировать не только физические характеристики устройств, но и сложную логику их функционирования и взаимодействия с сопряжёнными системами, основываясь на знаниях специалистов предметной области, а также решать проблемы подготовки испытаний и анализа их результатов в тесной интеграции с имитационными моделями функционирования объектов контроля в составе контрольно-проверочной аппаратуры.

В этой связи актуально создание новой технологии, обеспечивающей формализованные подходы к построению и применению цифровых двойников для поддержки научно-производственных процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов. Новая технология должна обеспечивать формирование баз знаний, агрегирующих знания специалистов предметной области, их интеграцию с программно-математическими моделями технических систем, обеспечивать механизмы подготовки и проведения испытаний, расширяемость измерительных возможностей, а также применение имитаторов бортовых систем и окружения для проведения испытаний и анализа получаемых результатов, что повысит качество и сократит сроки проведения испытаний.

На основании проведённого анализа системной проблемы и существующих подходов к её решению сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе выполнена формализация понятия интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовой системы, что позволило применить формальный подход к созданию цифровых двойников. В описании модели используются элементы технологии искусственного интеллекта и технического моделирования. Модель обладает гетерогенной архитектурой (разнородностью по составу или происхождению элементов), которая достигается

за счёт интеграции проблемно-ориентированных баз знаний и виртуальных инструментов – программно-математических моделей, что позволяет представлять логику функционирования бортовых систем и их технические характеристики. Базы знаний объединяют формализованные знания специалистов предметной области, представленные в виде продукционных правил, извлечённые зависимости из методик испытаний бортовых систем и результатов натурных экспериментов.

Формализация понятия интеллектуальной имитационной модели. *Интеллектуальная имитационная модель S* определяется как

$$S = <G, F, T>,$$

где G – структурно-параметрическое описание (множество элементов структуры представляемой бортовой системы), F – функциональное описание (множество способов функционирования), T – моменты времени наблюдения (таймеры). Такое представление выполняет разделение между представлением знаний и их использованием, что обеспечивает расширяемость методов работы модели.

Структурно-параметрическое описание модели представляет собой

$$G=<B, I, C, D, P>,$$

где B – множество элементов модели, имитаторы отдельных устройств, I – множество коммутационных интерфейсов элементов, C – множество коммутационных соединений между элементами модели, D – множество структур данных, P – множество переменных для описания параметров моделируемых устройств, передаваемых и получаемых данных.

Множество элементов $B=\cup B_i$, где $B_i=<N_i, E_i, I^i, X^i, Y^i>$, $i= [1,\ldots,|B|]$, $|B|$ – количество элементов модели, N_i – наименование i-го элемента, E_i – тип устройства, $I^i \subseteq I$ – подмножество коммутационных интерфейсов, $X^i \subseteq X$, $Y^i \subseteq Y$ – подмножества параметров P.

Множество $I^i=(\cup I^i_{qi}) \subseteq I$ – подмножество коммутационных интерфейсов для элемента модели B_i, где qi $=[1, |I^i|]$ – количество точек входов и выходов. Интерфейс I^i_n имеет характеристики: тип интерфейса $Tp(I^i_n)$, направленность передачи $Rt(I^i_n)$ и признак состояния $Onf(I^i_n)$. Множества характеристик задаётся при семантической интерпретации элементов модели.

Множество $C=\cup C^{ij}$ – всех соединений элементов модели, где C^{ij} – коммутационные интерфейсы между B_i и B_j. $C^{ij}=\cup C^{ij}_{nm}$, где $C^{ij}_{nm}=<I^i_n, I^j_m>$ – соединение элементов B_i и B_j по интерфейсам I^i_n и I^j_m.

Множество структур данных D включает стандартные типы данных и специальные конструкции, которые позволяют настраивать модель на предметную

область. В множество D входят структуры пакетов команд – $D^K \subseteq D$ и структуры пакетов телеметрической информации – $D^t \subseteq D$. Дополнение структур данных структурами пакетов телеметрии и телекоманд позволяет оперировать ими при создании функционального описания модели. Множество параметров $P=X \cup K \cup Y$, где X – множество входных воздействий: настройки, параметры, импульсы, сигналы; K – множество команд, Y – множество наблюдаемых параметров. Множество P задаётся в структурах данных D.

Функциональное описание модели объединяет логический и физический уровни моделирования:

$$F=\{R: A \rightarrow Z,\ Y=V(X)\},$$

где $R: A \rightarrow Z$ – множество правил базы знаний, $Y=V(X)$ – множество виртуальных инструментов, представляющих собой программно-математические модели, построенные в среде технического моделирования. Такой подход обеспечивает построение цифровых двойников бортовых систем, формально объединяя модели, данные и знания о методах функционирования устройств.

Каждое правило $R_l \in R$ задаёт конструкцию $R_l: A^l \rightarrow Z^l$, где $A^l=A_1 \& A_2 \& \ldots \& A_r$ – логическое выражение, определяющее условие выполнения правила (антецедент), $Z^l=Z_1,\ Z_2,\ldots,\ Z_m$ – действия, изменяющее состояние модели (консеквент). Антецедент и консеквент представляют собой выражения над параметрами, заданными в структурно-параметрическом описании. Выражение $A^l=<I^l, X^l, K^l, T^l>$, где $I^l \subseteq I$, $X^l \subseteq X$, $K^l \subseteq K$, $T^l \subseteq T$ задаёт интерфейсы из множества I, на которые поступают данные из множества X или команды из K, а также состояния таймеров из T, определяющих время наступления событий. Действие $Z^l=<I^l, Y^l, K^l, T^l>$ – задаёт изменение состояния элементов модели: передачу данных на интерфейсы из I, определение выходных параметров из Y, запуск таймеров. Антецеденты всей базы знаний описываются множеством $A=<I^A, X^A, K^A, T^A>$, где $I^A \subseteq I$, $X^A \subseteq X$, $K^A \subseteq K$, $T^A \subseteq T$. Консеквенты множеством $Z=<I^Z, Y^Z, K^Z, T^Z>$, где $I^Z \subseteq I$, $X^Z \subseteq X$, $K^Z \subseteq K$, $T^Z \subseteq T$. Заметим, что в общем случае $K^A \cap K^Z \neq \varnothing$ и $K^A \cup K^Z = K$.

Предлагается структурировать базу знаний по разделам, описывающим отдельные устройства – элементы модели. Для этого для каждого B_i из множества R выбирать подмножество $R^i \subseteq R$, содержащее правила функционирования B_i. $R^i=\cup R^i_j$, то есть для $\forall\ (R^i_j: A^i_j \rightarrow Z^i_j)\ \exists\ B_i \mid R^i_j \in R^i$.

Введены операции над моделью, которые позволяют формализовать и автоматизировать построение и анализ моделей. Пусть заданы множества свойств: $M^1,\ M^2, \ldots M^i, \ldots,\ M^p$ и кортеж значений свойств $Q=<M_1,\ M_2, \ldots M_i, \ldots,\ M_p>$, где $M_1 \subseteq M^1$, $M_2 \subseteq M^2, \ldots\ M_i \subseteq M^i, \ldots,\ M_p \subseteq M^p$.

Проекция $Pr(Q, M^i)=M_i$. Например, для того, чтобы выбрать все команды, для которых есть правила их приёма, нужно выполнить проекцию антецедентов правил $A=<I^A, X^A, K^A, T^A>$ на множество команд K: $Pr(A_k, K)=\{k_i \in K^A\}$. Мощность множества правил, в которых участвует интерфейс I^i_n элемента модели B_i можно вычислить как количество элементов в проекциях $Pr(A, I^i_n)$ и $Pr(Z, I^i_n)$, то есть $|R(I^i_n)|=|Pr(A, I^i_n) \cup Pr(Z, I^i_n)|$.

Выборкой $Sel(Q, \theta)$ назовём множество элементом из Q, удовлетворяющих условию θ. Например, $Sel(R, K=k_i)$ задаёт множество правил, моделирующих функции отработки команды k_i. Заметим, что если $A^i \subseteq A$, то $Sel(A^i, \theta) \subseteq A^i \subseteq A$, то есть операция выборки не выходит за пределы исходного множества.

Цепочка правил $Rch^i \subseteq R^i$ – это последовательность правил, выполняемых в процессе логического вывода для элемента модели B_i. Цепочки правил $Rch^i \subseteq R^i$ и $Rch^j \subseteq R^j$ находятся в *отношении зависимости* $Dep(Rch^i, Rch^j)$, если выполнение Rch^i влечёт выполнение Rch^j. Отношение зависимости не симметрично, то есть $Dep(Rch^i, Rch^j) \neq Dep(Rch^j, Rch^i)$.

Объединение зависимых цепочек правил описывает взаимодействие множества элементов модели: $FMod(B_1,\ldots, B_p)=Rch^1 \cup Rch^2 \cup \ldots \cup Rch^p$, такое что $\forall\ i\ \exists\ j \mid Dep(Rch^i, Rch^j)$ или $Dep(Rch^j, Rch^i)$ $i, j \in [1, \ldots, p]$. Отношение зависимости Dep определяет частичный порядок на множестве $FMod$. Объединение зависимых цепочек правил не выходит за пределы базы знаний $FMod(B_1,\ldots, B_p) \subseteq R$.

Семантическая интерпретация модели. Предлагается семантическая интерпретация формального описания интеллектуальной имитационной модели в терминах предметной области. Результатом является интеллектуальная модель, имитирующая процессы работы бортовых систем с учётом их логической структуры и последовательности событий. Основными элементами модели являются объекты, который на основе входных данных (множество X) и команд управления (множество K), применяя заложенные методы $F=\{R, V\}$, изменяют своё состояние, параметры из Y. Методы F разделяются на декларативные – заданные в базе знаний R и императивные, заданные в виде зависимостей V, интегрируемые в модель. Их объединение выполняется на семантическом уровне за счёт приведения входов и выходов методов к единому структурно-параметрическому описанию. Предусмотрен параметрический способ интеграции, при котором антецеденты из A правил базы знаний R формируются на основе выходных параметров Y методов V или консеквенты Z правил задают входные параметры X для методов V. Информационное взаимодействие эле-

ментов модели осуществляется путём передачи данных по коммутационным соединениям.

Семантическая интерпретация множества $B=\cup B_i$: B_1 и B_7 – имитаторы интерфейсного модуля командно-измерительной системы (МИ КИС) основной и резервный соответственно; B_2 – наземный сегмент в части приёма команд и анализа телеметрии (НС); B_3 и B_8 – бортовое управление бортовой комплекс управления (БУ БКУ) основной и резервный, B_4 – бортовая аппаратура телесигнализации (БАТС), B_5 и B_6 – имитаторы приёмо-передающих устройств (Приёмник, Передатчик). Для каждого B_i определены множества $I^i=I^i_1\cup\ \ldots\cup\ I^i_{qi}$ и коммутационные соединения $C=\cup C^{ij}$. Интерпретация коммутационных интерфейсов, определяющая направления передачи данных и состояние интерфейсов: $Rt\,(I^i_{qi})\subseteq\{Вх,\ Исх\}$ – входящие (*Вх*) или исходящие (*Исх*); $Onf(I^i_{qi})\subseteq\{Вкл,\ Выкл\}$ – возможна передача данных (*Вкл*) или передача невозможна (*Выкл*). Типизация коммутационных интерфейсов определяет единые правила обработки данных, передаваемых по однотипным интерфейсам: $Tp(I^i_{qi})\subseteq\{RS\text{-}232,\ RS\text{-}422,\ МКО,\ ВЧ,\ имп.,\ рел.,\ num.\}$ – обозначения: релейный (*рел.*), импульсный (*имп*), recommended standard 232 (*RS-232*), recommended standard 422 (*RS-422*), высокочастотный (*ВЧ*) и мультиплексный канал обмена (*МКО*), интерфейс для управления источниками питания (*num*).

Определены структуры данных: $D^K\subseteq D$ – множество структур пакетов команд, $D^t\subseteq D$ – пакетов телеметрической информации. Построено множество команд управления $K=(K_{КИС}\cup K_{БКУ})$, где $K_{КИС}$ – команды, предназначенные для управления функциями командно-измерительной системы, $K_{БКУ}$ – команды для бортового управления БКУ. Подмножества $K_{КИС}$ и $K_{БКУ}$ не пересекаются, то есть $k\in K_{КИС}$ или $k\in K_{БКУ}$. Для каждой команды k, задана структура данных $D^K\in D$, выбран тип команды ($k\in K_{КИС}$ или $k\in K_{БКУ}$) и значения полей в пакете данных.

На рисунке 1 показан пример графической интерпретации модели, представляющий конфигурацию логически связанных систем командно-телекоммуникационного взаимодействия. Блоки графической структуры отображают элементы модели, имитирующие различные устройства и системы, поля в блоках – входные и выходные интерфейсы устройств, линии между блоками – коммутационные соединения, стрелки и точки у интерфейсов (• – «*Вх*», o – «*Исх*») – направления передачи данных. Функционирование каждого блока реализуется базой знаний или виртуальным инструментом, взаимодействие опи-

сывается протоколами, между блоками передаются специализированные структуры данных – пакеты команд и телеметрической информации.

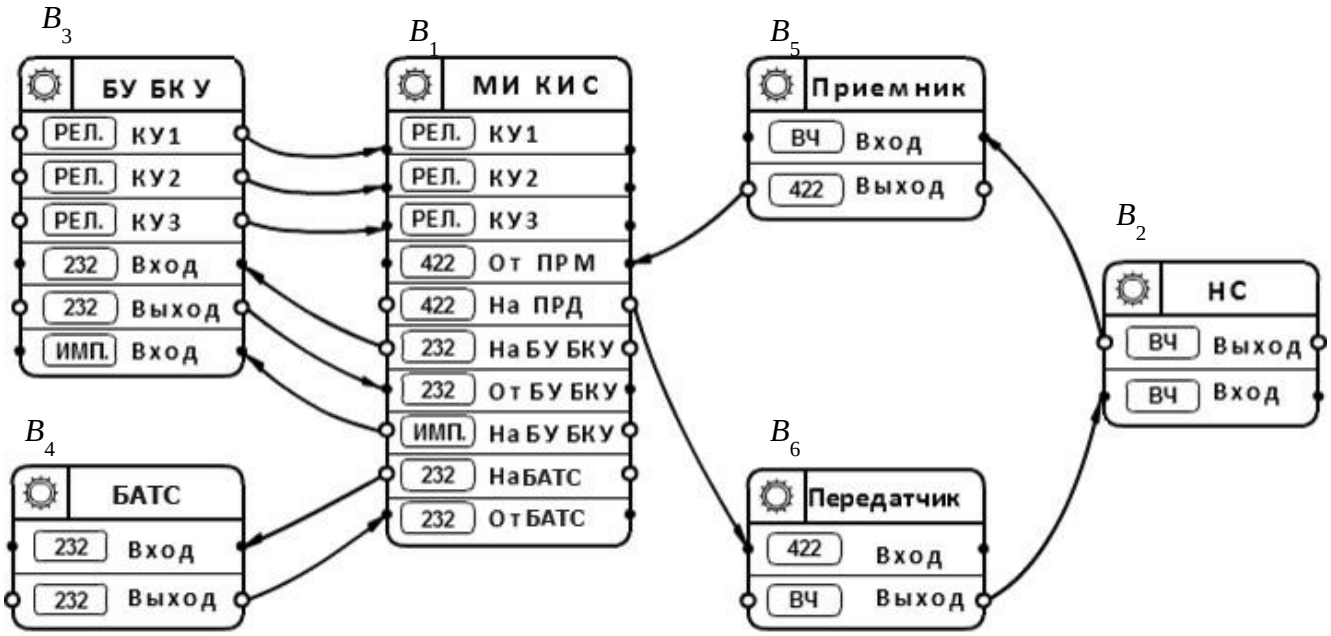

Рисунок 1 – Фрагмент графической структуры модели

Предлагается семантическая интерпретация правил базы знаний, описывающих различные действия элементов модели. Передача данных представляется правилами вида: «$A_1 \rightarrow Z_{11}$, Z_{12}», где A_1=«По интерфейсу I_{11} получены данные», Z_1=«Записать данные в переменную P_1», Z_2=«Передать на интерфейс I_{12} переменную P_1 длиной n байт начиная с m-го». Свойства интерфейсов $Rt\ (I_{11})$=«*Вх*», $Rt\ (I_{12})$=«*Исх*», $Onf(I_{11})=Onf(I_{12})$=«*Вкл*», $Tp(I_{11})=Tp(I_{12})$. Изменение настроек элементов модели или режимов работы, на основе поступающих команд управления, задаётся правилами вида: «$A_{21}\&A_{22}\&A_{23} \rightarrow Z_{21}$, Z_{22}», где A_{21}=«По интерфейсу I_2 получены данные», A_{22}= «Полученный массив байт = k», A_{23}=«$k \in K$», Z_{21}=«Выполнить команду k», Z_{22}=«Изменить значение переменных $P_{31} \ldots P_{3n}$». Управление режимами представляется в виде: «$A_{31}\&A_{32}\&A_{33} \rightarrow Z_{31}$, Z_{32}», где A_{31}=«По интерфейсу I_3 получены данные», A_{32}=«Переменная P_3 = «Режим выключен», A_{33}=«Полученный массив байт = переменная P_3 (контроль запроса), Z_{31}=«Запустить таймер T», Z_{32}=«Переменная P_3 = «Режим включён».

На основе формализации модели предлагаются критерии её корректности:

1. $\forall\ (C^{ij}_{nm} = <I^i_n, I^j_m>)$ $Tp(I^i_n)=Tp(I^j_m)$ и $Rt(I^i_n) \neq Rt(I^j_m)$ – соединение допустимо только по однотипным и разнонаправленным интерфейсам.

2. Для входного интерфейса должно быть правило приёма данных: $\forall\ (I^i_n \in I)$ если $Rt(I^i_n)$=«*Вх*» то $Sel(A^i, I=I_i) \neq \varnothing$.

3. Для исходящего интерфейса должно быть задано правило передачи данных: $\forall$ ($I^i_n \in I$) если $Rt(I^i_n)$=«*Исх*» то $Sel(Z^i, I=I_i) \neq \varnothing$.

4. Для изменения состояния интерфейса в базе знаний должны быть правила: $\forall$ ($I^i_n \in I$) если $Sel(A^i, Onf(I^i_{qi})) \neq \varnothing$, то $Sel(A^i, \neg\, Onf(I^i_{qi})) \neq \varnothing$.

Методы построения интеллектуальных имитационных моделей. Разработаны методы, которые упрощают создание базовых элементов цифровых двойников: выполняют поддержку построения моделей, предоставляя критерии их пошагового улучшения на основе эвристического поиска и обеспечивая формальные принципы интеграции гетерогенных реализаций моделей, предоставляют инструменты структурно-графического исследования моделей, извлечения знаний из методик испытаний и анализа качества моделирования по их результатам. Под термином *Метод* понимается способ исследования, предназначенный для решения задачи или достижения цели, который выполняется по следующему плану: назначение, область применения, ограничения, описание (последовательности действий, алгоритмы, блок-схемы, инструкции), сложность, интерпретация результатов.

Эвристический метод построения модели. *Назначение метода.* Метод предназначен для построения модели S путём выполнения последовательности преобразований S^1, S^2, …, S^n, которые отражают пошаговое приближение к целевому объекту S^0.

Область применения. Выбор наилучшей последовательности преобразований модели при высокой вариативности на основе эвристических оценок промежуточных состояний.

Ограничения. Метод является адаптацией алгоритма A^*, использующего эвристическую функцию оценки стоимости пути от каждого состояния до цели, его ограничения вытекают из ограничений исходного алгоритма.

Описание метода. Для проектирования модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата применяется технология системного моделирования, заключающаяся в построении модели S, которая представляет собой образ системы-оригинала S^0 при моделирующем отображении f: $S=f(S^0)_v$, где функция f задаёт отображение системы S^0 в модель в соответствии с целевым назначением v. Алгоритм построения модели показан на рисунке 2.

Моделирующее отображение f представляется в виде композиции двух отображений – огрубляющего q и гомоморфного r, то есть $q(S^0)=S^1$, $r(S^1)=S$, $r(q(S^0))_v = S$, где S^1 есть модель S^0. Положим, что моделирующее отображение q выполняет построение множества G: $q(S^0)=<G, F=\varnothing, T>$. Модель S^1, содержит

структурно-параметрическое описание. Отображение r обеспечивает построение множества F: $r(q(S^0))_v = <G, F, T>$.

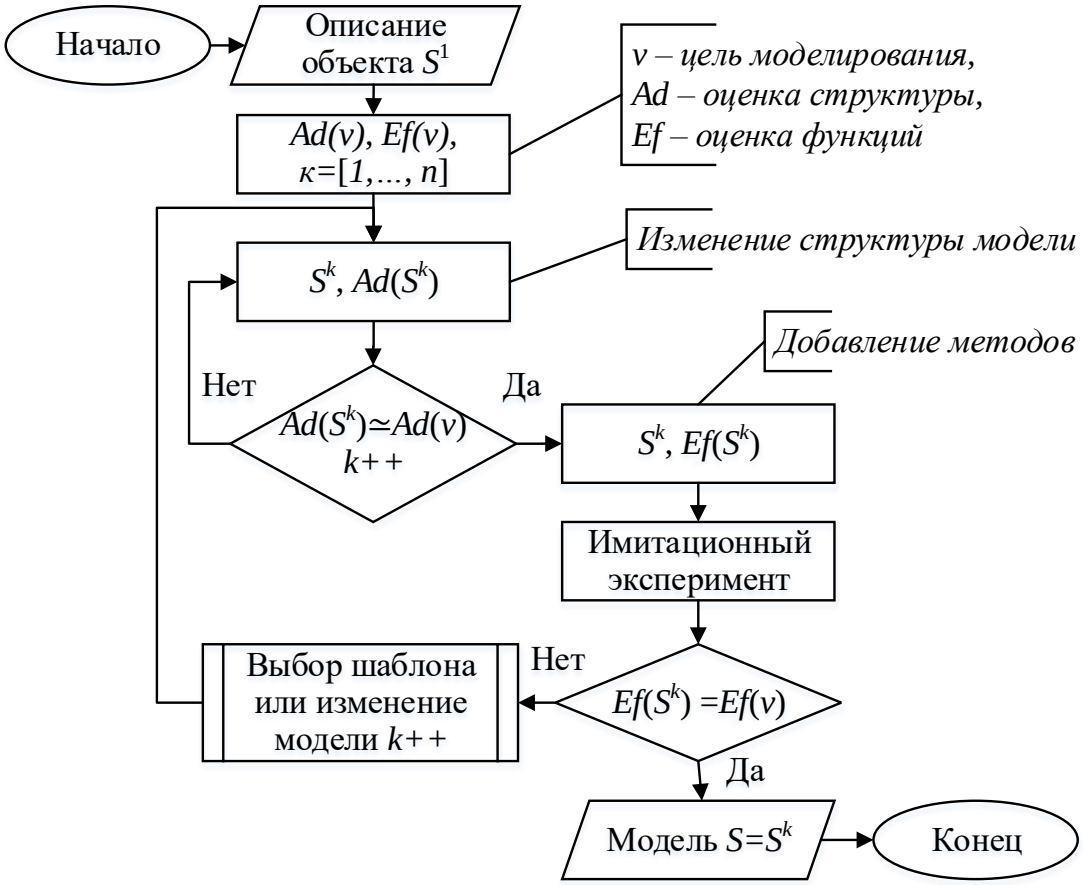

Рисунок 2 – Алгоритм построения модели

Предлагается строится дерево допустимых изменений, определяющее переходы от текущего состояния модели к последующим состояниям и выполнять оценку каждого состояния на основе эвристической функции: $g(S^k) + h^*(S^k)$, где $g(S^k)$ – стоимость наилучшего пути от S^1 к S^k, $h^*(S^k)$ – предполагаемая стоимость предстоящего пути к целевому состоянию модели – определяется как степень близости модели S^k к целевому состоянию модели S^n. Предлагается функция g: $g(S^k)=Ad(S^k)/Ad(v)$, где Ad – значения показателя, вычисляемого по структуре модели, эвристическая функция h^*: $h^*(S^k)=Ef(S^k)/Ef(v)$, где Ef – выбранная экспертом оценка. Оценка $h^*(S^k)$ выбирается таким образом, чтобы его значение было меньше или равно весу кратчайшего пути от S^k до S^n. Это условие выполняется по построению нормированием оценки на значение ожидаемого целевого пути для v. На каждом шаге выбирается путь по дереву, обеспечивающий лучшее значение функции $g(S^k)+h^*(S^k)$. Для расчёта Ad предлагается функция: $Ad(S)=a\cdot|B| +b\cdot|I| +c\cdot|C|$, где a, b, $c \leq 1$ весовые коэффициенты.

Для оценки *Ef* предложены эвристические показатели:

1. *Функциональная нагрузка*: $\forall (B_i \in B)\ |R^i| \neq 0$, R^i – множество правил функционирования B_i;

2. *Наличие альтернативных путей передачи данных*: $|L(I^i{}_n, I^j{}_m)|$ где I_i^n – интерфейс B_i, I_j^m – интерфейс B_j.

3. *Максимальная длина пути*: $\max |L(I^i{}_n, I^j{}_m)|$, где $I^i{}_n$, $I^j{}_m$ – интерфейсы B_i и B_j соответственно.

Предлагается для изменения состояния модели применять шаблоны, которые содержат цепочки правил: Rch^i, $Rch^j \subseteq R \mid Rch^i = Sel(R, K = k_i)$ и $Dep(Rch^i, Rch^j)$.

Интерпретация: Метод обеспечивает построение модели, приближенной к системе-оригиналу, обеспечивает простоту её структуры и наглядность моделирования с заданной степенью детализации.

Сложность метода. Метод является полным, в общем случае задача сводится к перебору всех вариантов преобразований модели. Применение эвристик, ограничений и шаблонов сокращает сложность построения структуры модели – $O(|I^2|+|P|)$, базы знаний – $O(h^*)$. Для создания цифровых двойников требуется дополнить модель данными натурных испытаний и включить в неё программно-математические модели технических систем.

Метод формирования баз знаний на основе программ испытаний. Предлагается метод, который позволяет включать в модель результаты испытаний реального оборудования и критерии контроля функционирования бортовой аппаратуры, определяемые по программам испытаний. На рисунке 3 показана алгоритмическая составляющая метода, определяющая последовательность формирования правил на основе методик испытаний. Для каждой команды $k \in K$ в испытаниях задаются параметры её передачи и критерии контроля. По этим данным формируются правила для элементов модели: B_1 – имитатор командно-измерительной системы; B_2 – имитатор наземной станции в части передачи команд и анализа телеметрии; B_3 – имитатор бортового комплекса управления.

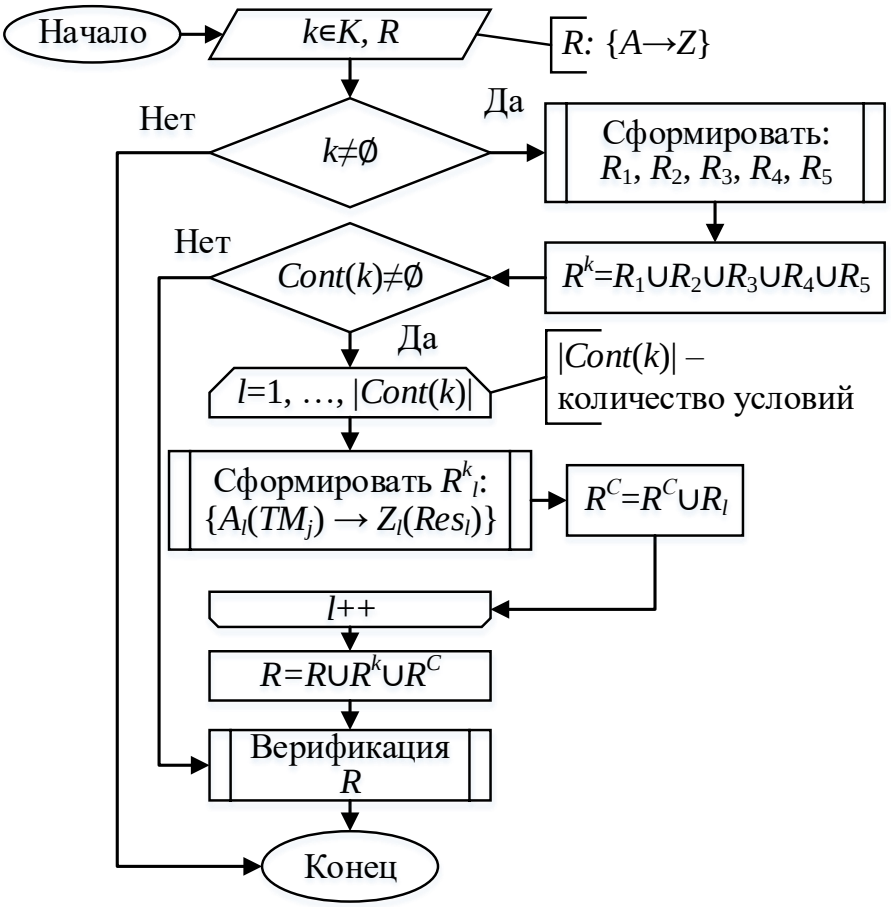

Рисунок 3 – Построение правил на основе методик испытаний

К множеству правил R: $A(I^i_n, X, K, T) \rightarrow Z(I^i_m, Y, K, T, D(K))$ добавляется множество правил $R^k = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cup R_4 \cup R_5$: R_1: $A_1(k) \rightarrow Z_1(I_1, k, T)$, где A_1=«$k \neq \varnothing$», Z_1=«на интерфейс $I_1 \in C^k_{12}$ передать k и установить T=«время ожидания». R_2: $A_2(I_2) \rightarrow Z_2(k)$, где A_2=«на интерфейс $I_2 \in C^k_{12}$ поступил массив байт» ∪ «структура массива =D^k», Z_2=« k = массив байт». R_3: $A_3(k) \rightarrow Z_3(I_3, k)$, где A_3=«k=РК$_{БКУ}$», Z_3=«на интерфейс $I_3 \in C^k_{13}$ передать k». R_4: $A_4(I_4) \rightarrow Z_4(I_5, k)$, где A_4=«на интерфейс $I_4 \in C^k_{13}$ поступил массив байт» ∪ «структура массива = D^k», Z_4=«k= массив байт» ∪ «на интерфейс $I_5 \in C^r_{41}$ передать данные DR_i». R_5: $A_6(I_6) \rightarrow Z_5(TM_j)$, где A_5=«на интерфейс $I_6 \in C^t_{12}$ поступил массив байт» ∪ «структура массива = D^t», Z_5=«TM_j= массив байт», $TM_j \in TM$ – телеметрия. К полученному множеству R^k добавляем правила R^k_l (l =1, …, $|Cont(k)|$, $|Cont(k)|$ – количество условий для контроля отработки команды k. (R^k_l: $A_l(TM_j) \rightarrow Z_l(Res_l)$), где $A_l(TM_j)$=«параметр TM_j по адресу Adr_l = Res_l» Z_l=«контроль TM_j». Правила для имитаторов сопряжённых устройств, осуществляющих передачу данных для обеспечения информационного взаимодействия между указанными элементами, заданы универсально и не требуют изменения

при модификации базы знаний. Сложность метода определяется числом критериев анализа $Cont(k)$, заданных в испытаниях – $C_F = \sum_{i=1}^{K}(|Cont(k_i)| + |R^k|)$.

Метод интеграции баз знаний и виртуальных инструментов. Предлагается метод интеграции разнородных реализаций моделей в гетерогенной архитектуре на основе единого семантического пространства параметров модели. Пусть имеется структурно-параметрическое описание модели и виртуальный инструмент, моделирующий зависимость входных и выходных параметров $Y^V=V(X^V)$, структуры данных определены в множестве D. Виртуальный инструмент может иметь сложные алгоритмы вычислений, заданных в виде декомпозиции методов в библиотеке инструментов. Для интеграции виртуального инструмента в модель создаётся элемент B_i, представляющий семантическое отображение устройства, моделируемого виртуальным инструментом. В структурно-параметрическое описание модели для элемента B_i добавить множество I^i и коммутационные соединения с другими элементами модели. Для B_i задать параметры $P^i=X^i \cup Y^i$. Сопоставить множества параметров X^i и Y^i из B_i с X^V и Y^V из V соответственно, так что $\forall\ (x\in X^V)\ Sel(P^i,\ x\in X^i) \neq\varnothing$, $\forall\ (y\in Y^V)\ Sel(P^i,\ y\in Y^i) \neq\varnothing$. Базу знаний элемента B_i дополнить правилами вида $(R^i\colon A^i\rightarrow Z^i)$ такими, что $Pr(Z^i,\ P^i)=X^i$ – определяют входные переменные для виртуального инструмента и $Pr(A^i,\ P^i)=Y^i$ – задают реакции на выходные переменные. Интеграция позволяет выполнять моделирование логики работы систем и включать в модель программно-математические имитаторы для анализа технических характеристик.

Методы анализа интеллектуальных имитационных моделей. Предлагаются оригинальные методы, позволяющие исследовать модели командно-программного управления бортовой аппаратурой для поддержки жизненного цикла бортовых систем в задачах их проектирования. Метод структурно-графического анализа, позволяющий выполнять поиск ошибок в структурно-параметрическом и функциональном описании модели по заданным на основе формальных представлений эвристическим показателям. Метод оценки надёжности конфигурации бортовых систем, который позволяет строить структурные схемы, учитывающие количество резервов и способы резервирования отдельных элементов модели, а затем рассчитывать вероятность безотказной работы построенной схемы. Метод анализ имитационной модели на основе испытаний бортовой аппаратуры выполняет сравнение результатов испытаний оборудования с результатами имитационных экспериментов, проводимых на интеллектуальных моделях. Методы предоставляют формальные критерии для анализа проектных решений, выполняя исследование функционального представления

модели, поиск ошибок в структурах, результатах моделирования, обнаружение недостающих или избыточных данных.

Новые методы позволяют выполнять построение и интеграцию базовых компонент цифровых двойников: объединяя имитаторы устройств на основе баз знаний, виртуальных инструментов и программ испытаний в сложную систему, описывающую пути, направления и способы взаимодействия бортовых систем и обеспечивают применение цифровых двойников для поддержки проектирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

В третьей главе предлагаются методы моделирования и анализа функционирования бортовых систем, которые обеспечивают применение цифровых двойников для поддержки испытаний бортовых систем космических аппаратов.

Метод моделирования командно-программного управления. Метод позволяет имитировать и анализировать различные сценарии функционирования бортовых систем, определяя порядок передачи команд, задавая контрольные точки для их анализа, формируя и исследуя телеметрическую информацию. Метод включает алгоритмы имитации формирования и передачи телеметрической информации, отработки команд и телеметрического контроля, на основе базы знаний. Пример алгоритма моделирования отработки команд приведён на рисунке 4.

В основе метода лежит расширенный метод логического вывода. Выполняется моделирование бортовых систем: B_1 – командно-измерительной системы; B_2 – наземного сегмента; B_3 – бортового комплекса управления, B_4 – бортовой аппаратуры телесигнализации, структур и пакетов данных: $D^k \subseteq D$ – структуры команд, $D^t \subseteq D$ – структуры телеметрической информации, $K = K_{КИС} \cup K_{БКУ}$ – множества команд, $K^t \in K_{БКУ}$ – команда на запрос телеметрии, $TM \subseteq D^t$ – множество телеметрических данных, DR – ответы на команды (квитанции). $C^k \subseteq C$ – интерфейсы для передачи команд в B_1; $C^r \subseteq C$ – ответов на команды; $C^t \subseteq C$ – передачи телеметрической информации. I^k – множество коммутационных интерфейсов, определяющих контрольные точки для анализа прохождения команд.

Для каждого элемента модели B_j построены правила $(R^j_n: A^j_n \rightarrow Z^j_n) \mid Pr(A^i_n, K) \neq \varnothing$ или $Pr(Z^j_n, I) \subseteq Pr(C^k \cup C^r \cup C, I)$ в антецеденте которых участвуют команды из K или в консеквенте заданы интерфейсы, предназначенные для передачи команд, квитанций или телеметрической информации. Для каждого R^j_n строятся цепочки правил Rch^j, зависимые с R^j_n.

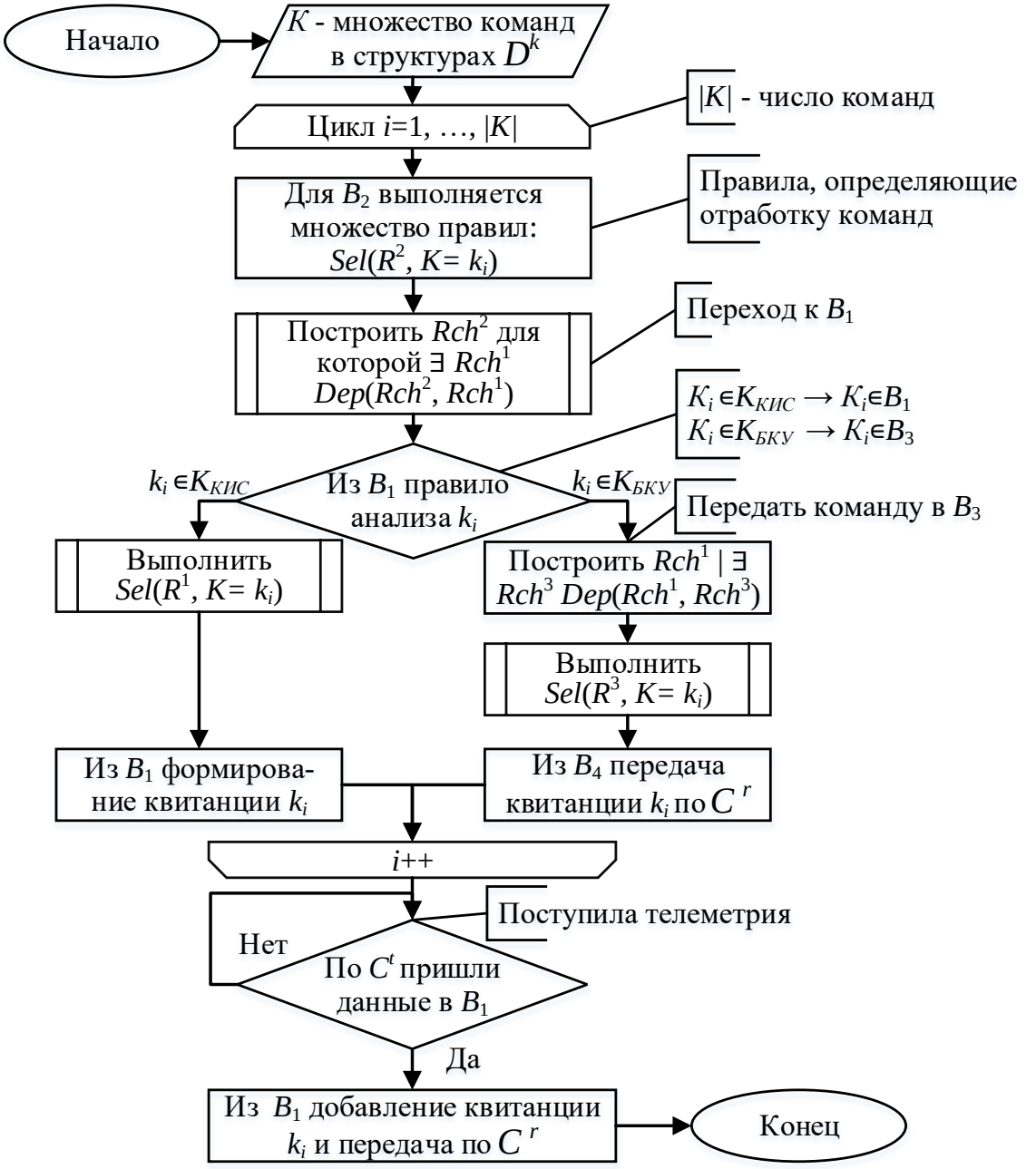

Рисунок 4 – Алгоритм моделирования отработки команд

Для моделирования информационного взаимодействия с B_1 выбираем $B'_j \in B$ для которых $\exists\ (C^{1j}{}_{nm} \in C) \mid C^{1j}{}_{nm} = <I^{1}{}_{n}, I^{j}{}_{m}>$, где $I^1{}_n$ – интерфейс B_1, $I^j{}_m$ – интерфейс B_j или $C^{jp} \in (C^k \cup C^r \cup C^t)$. Для каждой команды k_i выполняем правило его передачи из B_2, $(R^2{}_q: A^2{}_q \rightarrow Z^2{}_q)$, где $k_i \in Pr(A^2{}_j, K)$. Команды, пришедшие в B_1, анализируются и выполняются или передаются в B_4. В B_1 формируется квитанция из *DR* и передаётся в B_2 пакетом *TM*. B_2 выполняет анализ и контроль отработки команд по полученным параметрам *TM*. Сложность метода определяется количеством моделируемых команд управления $|K|$ и сложностью выполнения правил, входящих в цепочки отработки команд Rch^i: C_{com} =

$\sum_{i=1}^{|K|}\sum_{r\in Sel(R,k_i)}\sum_{r\prime\in Rch^i} C(r'\in Rch^i)$. На основе построенной имитационной модели разработан метод испытаний бортовых систем, который использует имитаторы для моделирования их взаимодействия с объектом контроля.

Сценарный метод поддержки испытаний. Предлагается подход, обеспечивающий актуализацию цифровых двойников данными натурных испытаний. Сценарный метод определяет формальные правила порождения испытательных процедур и алгоритмы их интерпретации для поддержки процессов подготовки и проведения испытаний.

Сценарий испытаний – последовательность испытательных действий: $Sc=<N_S, [Tsk_q \subseteq Tsk, BeginSt(Tsk_q), EndSt(Tsk_q), Cy(Tsk_q)], q=1,\ldots, |Tsk_q|>$, включающая N_S – наименование, Tsk_q – задания, $BeginSt(Tsk_q)$ и $EndSt(Tsk_q)$ – этапы выполнения, $Cy(Tsk_q)$ – количество циклов. Задание – совокупность действий, направленных на решение определенной задачи в сценарии. $Tsk_q=<N_T, [Act_r \subseteq Act, BginSt(Act_r), EndSt(Act_r)], 1\leq r\leq |Act|>$, 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, $Act_p=<N_A, X^p, Y^p=VI_p(X^p), Tun(X^p), Mpar(Y^p), StartA, StopA>$, 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 приведена на рисунке 5.

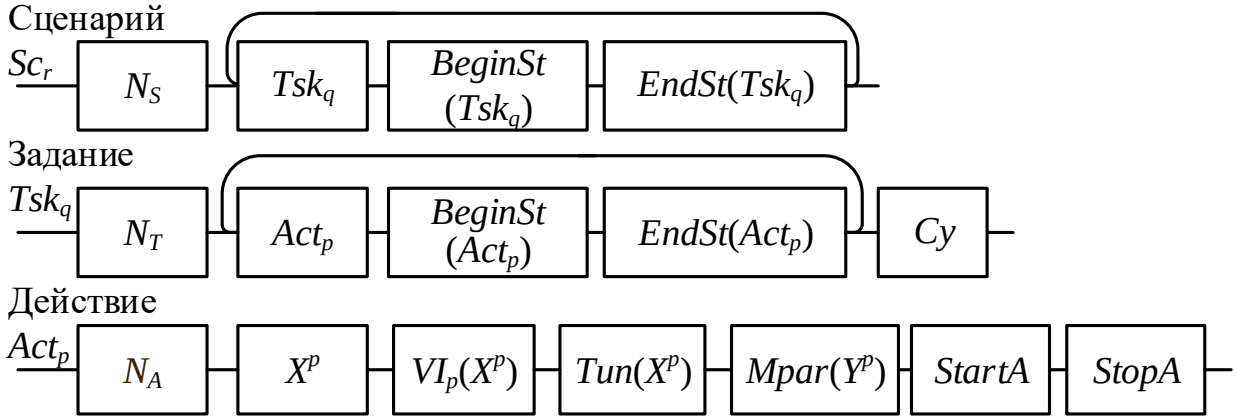

Рисунок 5 – Синтаксическая диаграмма сценария испытаний

Блоки диаграммы показывают элементы сценария, дуги – их повторяемость. Методика испытаний разбивается на подзадачи, каждая из которых реализуется в виде заданий, в которые, в свою очередь, входят действия. Действия

представляют собой указания на методы работы с испытательным оборудованием из библиотеки виртуальных инструментов.

Предлагается новый элемент сценария, обеспечивающий интеграцию сценарного метода испытаний с интеллектуальной имитационной моделью, предназначенный для анализа функционирования бортовых систем при их командно-программном взаимодействии. Синтаксическая диаграмма элемента сценария испытаний командно-программного управления приведена на рисунке 6.

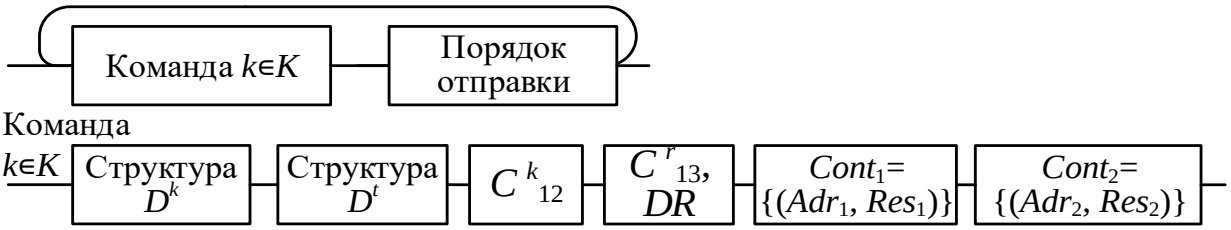

Рисунок 6 – Синтаксическая диаграмма элемента сценария испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой

Для каждой команды $k \in K$ задаются структуры данных и критерии контроля из имитационной модели: 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», $Cont_2(k)$ – «Контроль реакции на команду».

Формализация обеспечила автоматизируемость процессов подготовки и проведения испытаний бортовых систем космических аппаратов.

Для выполнения сценариев испытаний производится анализ структур сценария и формирование последовательность выполнения испытательных процедур. В состав метода вошли алгоритмы анализа структуры сценария и выбора заданий или действий в соответствии со сценарием. Алгоритм анализ структуры сценария испытаний приведён на рисунке 7.

Выполнение сценариев – это упорядоченная последовательность действий по этапам. Первый уровень задаётся структурой сценария, второй – структурой задания, третий – структурой действия. На каждом шаге эти структуры анализируются и выбираются задания Tsk_s, начало которых совпадает с текущим этапом, то есть на l-м этапе $BeginSt(Tsk_s)=l$.

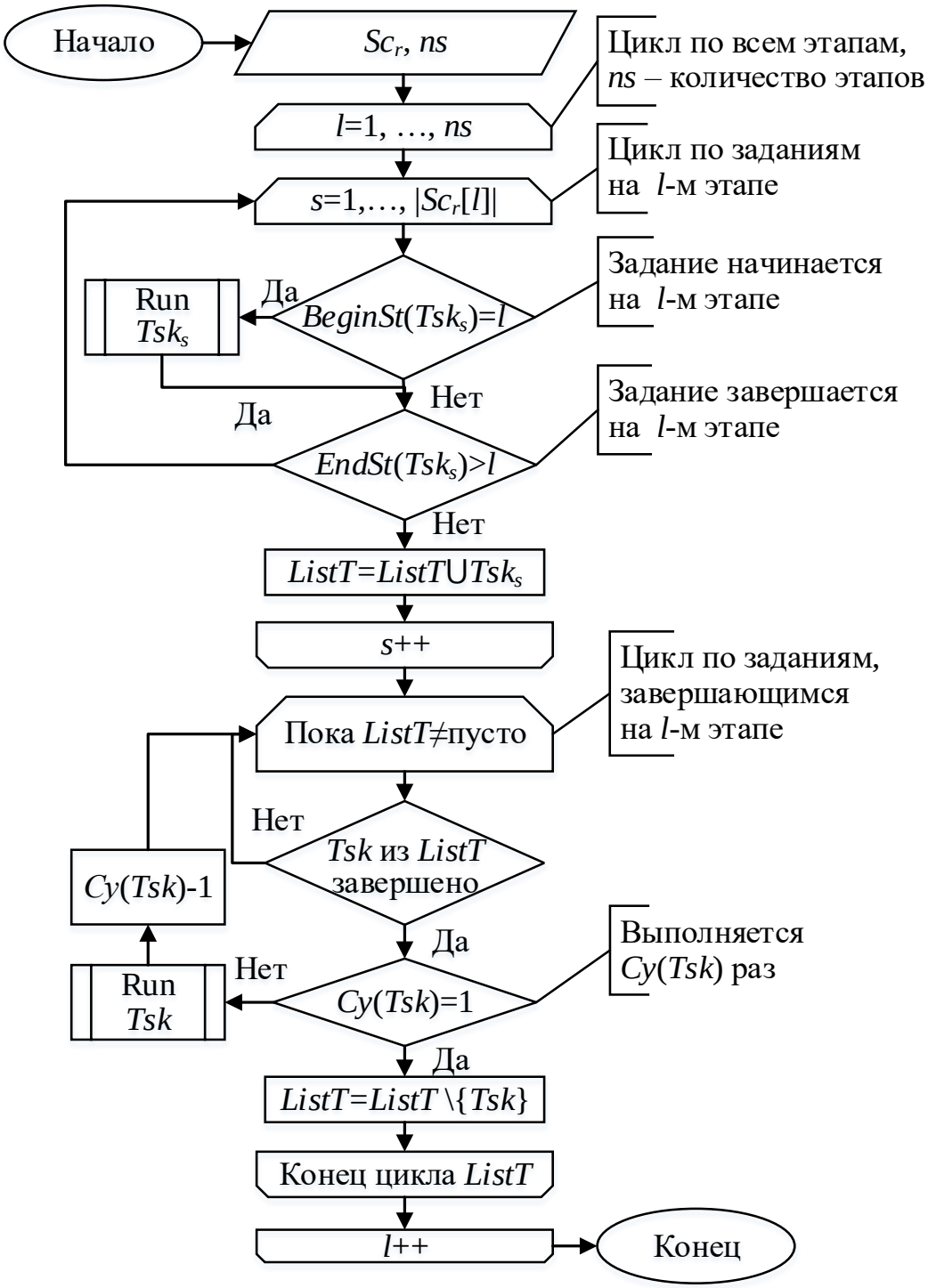

Рисунок 7 – Анализа структуры сценария испытаний

Задания помещаются в список и вызывается алгоритм анализа структуры задания, который выполняет поэтапный выбор действий с условием $BeginSt(Act_m)=k$, где k – текущий этап задания. После определения порядка действий на каждом этапе выполняется алгоритм анализа структуры действия в задании сценария. Для выполнения действия проверяется условие запуска $Bg_con(Act_m)$ и формируется набор виртуальных инструментов VI_m, необходимый для выполнения действия, параметров X^m и настроек $Tun(X^m)$. Длитель-

ность выполнения действия определяется либо длительностью проводимых в действии измерений, либо условием остановки, заданном в параметре *StopA*. Результаты выполнения действия анализируются в соответствии с критериями контроля $Mpar(Y_m)$. После завершения всех действий, для которых $EndSt(Act_m) = k$, алгоритм возвращается к предыдущему уровню структуры сценария – уровню заданий. Переход к следующему этапу сценария происходит только после завершения всех заданий, для которых $EndSt(Tsk_s)=l$. Задания, для которых $En(Tsk_s)>l$, продолжают выполнение.

Сложность метода $C_{cr} = \sum_{r=1}^{|Sc|} \sum_{q=1}^{|Tsk_r|} \sum_{p=1}^{|Act_q|} C(act_p \in Act_q)$, $C_{exe} = \sum_{r=1}^{|Sc|} \sum_{q=1}^{|Tsk_r|} \sum_{p=1}^{|Act_q|} C(VI_p \in Act_q)$ – определяется сложностью формирования сценария C_{cr}, зависящей от сложности действий $C(act)$ и сложностью его выполнения C_{exe}, определяемой на основе сложности работы виртуальных инструментов $C(VI)$.

Метод формирования испытаний на основе базы знаний имитационной модели. Метод обеспечивает применение цифровых двойников для подготовки испытаний командно-программного управления, при котором параметры и критерии контроля выбираются из базы знаний. Последовательность основных действий метода показана алгоритмически на рисунке 8.

На основе заданной в имитационной модели базы команд *K* формируется подмножество правил базы знаний, определяющее порядок работы имитаторов наземных и бортовых систем при моделировании выбранных команд $k_i \in K$. Выбираются правила (R^j: $A^j \rightarrow Z^j$) для которых $Pr(A^j, K)=k_i$. Строятся цепочки Rch^j, выполняемые в процессе логического вывода. Строится множество коммутационных соединений $(C^k \cup C^r \cup C^t) \in C$, по которым выполняется передача команд – C^k, ответов на команды – C^r и телеметрии – C^t.

Из правил, входящих в Rch^j выбираются параметры $Par(k_i)$, содержащие D^k – структуры команд, D^t – структуры телеметрии, DR_i – ответы имитаторов бортовых систем. Формируются критерии контроля прохождения команд $Cont(k_i)=(Adr, Res)$, где *Adr* – адрес параметра в телеметрии, *Res* – значение для сравнения. Выбранные из базы знаний параметры и критерии контроля формируют элемент сценария испытаний командно-программного взаимодействия бортовых систем. Сложность метода определяется множеством правил для команд, заданных в базе знаний: $C = \sum_{i=1}^{|K|} \sum_{j}^{|B|} \sum_{r \in Sel(R^j, k_i)} \sum_{l=1}^{|Sel(Rch^j, r)|} C(rch_l \in Sel(Rch^j, r))$.

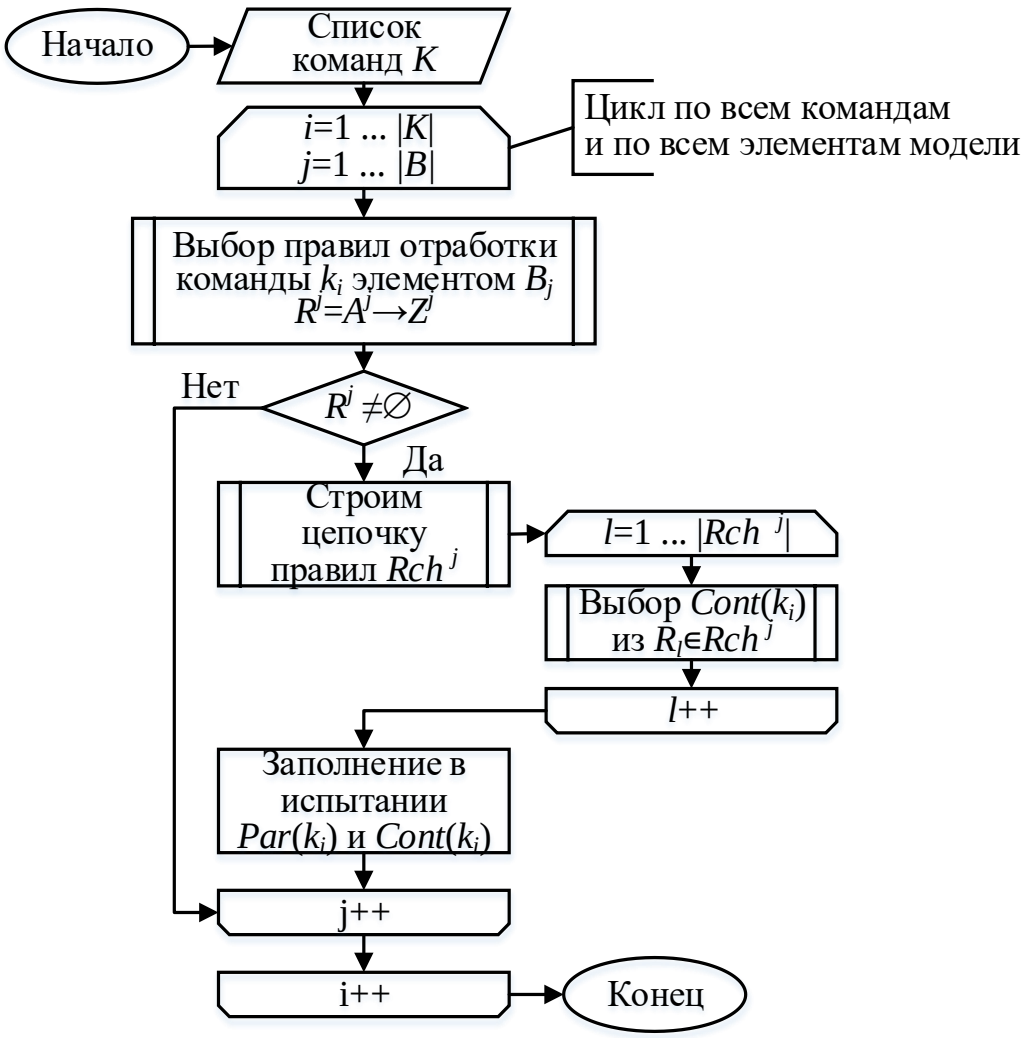

Рисунок 8 – Алгоритм формирования испытаний по базе знаний модели

Метод анализа результатов испытаний. Предлагается метод, основанный на применении прецедентов имитационного моделирования для анализа результатов испытаний. Алгоритмическая составляющая метода приведена на рисунке 9. Формируются *TM_List* – множество пакетов телеметрической информации объекта контроля и *Prec_List* – множество прецедентов имитационной модели. *Prec_List* =<*P_TM, P_Rule, P_K*>, где *P_TM* – телеметрия, формируемая имитационной моделью, *P_Rule* – правила базы знаний, *P_K* – команда. Выполняется поиск параметров телеметрии для прецедентов в *P_TM* и их сравнение с телеметрией объекта контроля в *TM_List*. В модели выбираются прецеденты, соответствующие телеметрии бортовых систем, и выполненные правила базы знаний. Для анализа результатов испытаний командно-программного управления поиск по базе прецедентов ограничивается моделированием заданной команды.

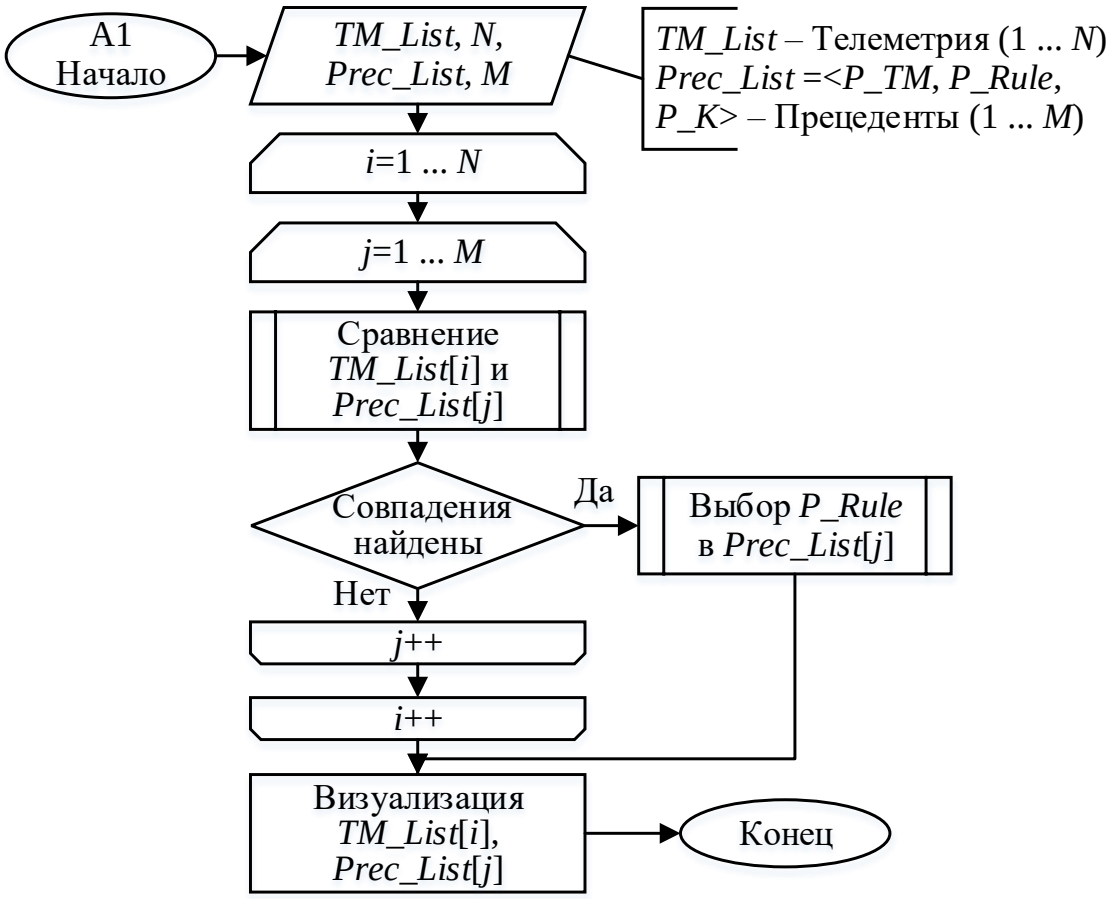

Рисунок 9 – Алгоритм анализа испытаний по базе прецедентов

Предложенный комплекс методов обеспечивает применение цифровых двойников в процессах испытаний бортовых систем: позволяя проводить анализ характеристик устройств на программных моделях, формировать методы испытаний реального оборудования и выполнять контроль результатов испытаний по данным имитационных экспериментов.

В четвёртой главе предлагается технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем. Под термином *Технология* понимается комплекс взаимосвязанных задач системной проблемы, подходов, методов и инструментов их решения, обеспечивающих повышение эффективности и снижение трудоёмкости информационных процессов. Новая технология основана на построении и применении базовых компонент цифровых двойников, включающих базы данных, программно-математические модели технических систем и данные натурных испытаний на всех этапах жизненного цикла производства бортовой аппаратуры.

Главным концептуальным принципом новой технологии является её конструктивность, то есть возможность применять её формализмы как для исследования системной проблемы, так и создавать на их основе проблемно-

ориентированные системы. Построена онтология, объединяющая задачи поддержки жизненного цикла бортовых систем и методы их решения в составе новой технологии и позволяющая унифицировать информационные ресурсы и методическое обеспечение. Выполнено структурно-функциональное моделирование, которое позволило унифицировать методы, входящие в состав технологии, исключить дублирующие функции и потоки данных. На рисунке 10 представлены задачи и методы новой технологии.

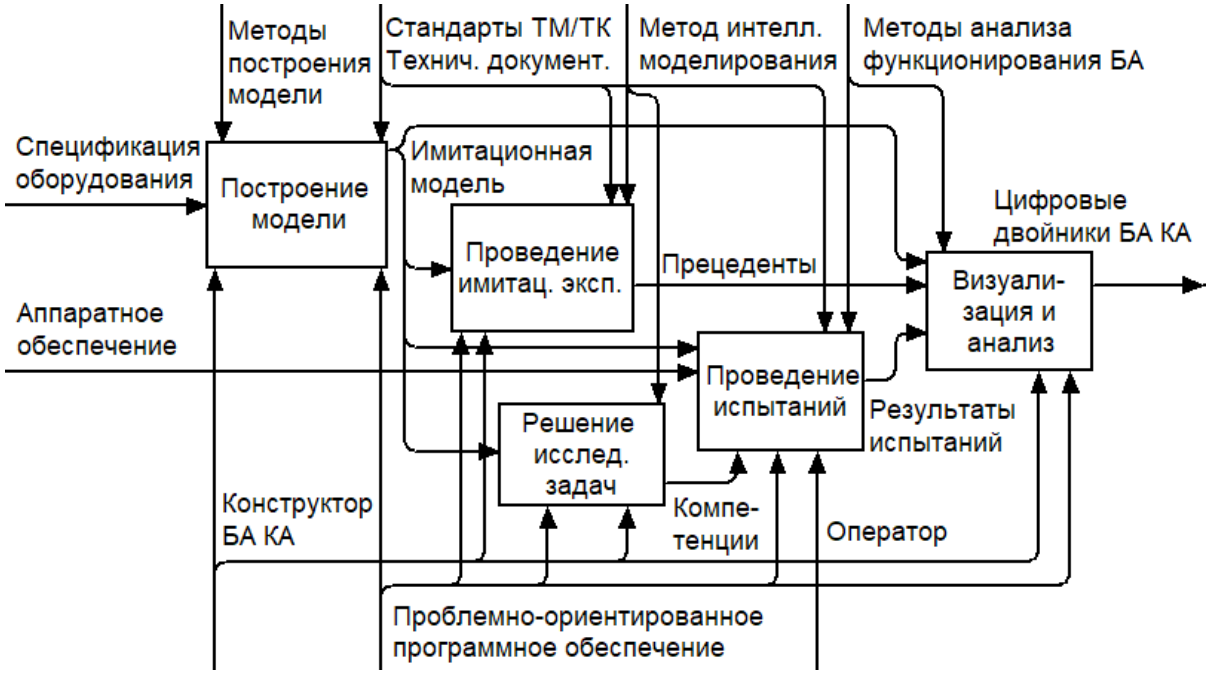

Рисунок 10 – Задачи и методы новой технологии

Методы в составе новой технологии: построения моделей, интеллектуального имитационного моделирования, сценарный метод подготовки и проведения испытаний, метод формирования испытательных процедур, метод испытаний отработки команд (испытаний командно-программного управления БА), метод анализа результатов по прецедентам имитационного моделирования и метод поддержки комплексных испытаний.

Декомпозиция задачи «Построение имитационных моделей» и методы её решения в новой технологии приведены на рисунке 11. Задача разбивается на построение графической структуры, реализацию правил функционирования, импорт моделей, интеграцию моделей, доработку моделей по результатам испытаний. Методы обеспечивают информационно-графическое моделирование, построение баз знаний, импорт и интеграцию моделей, генерацию правил на основе испытательных процедур.

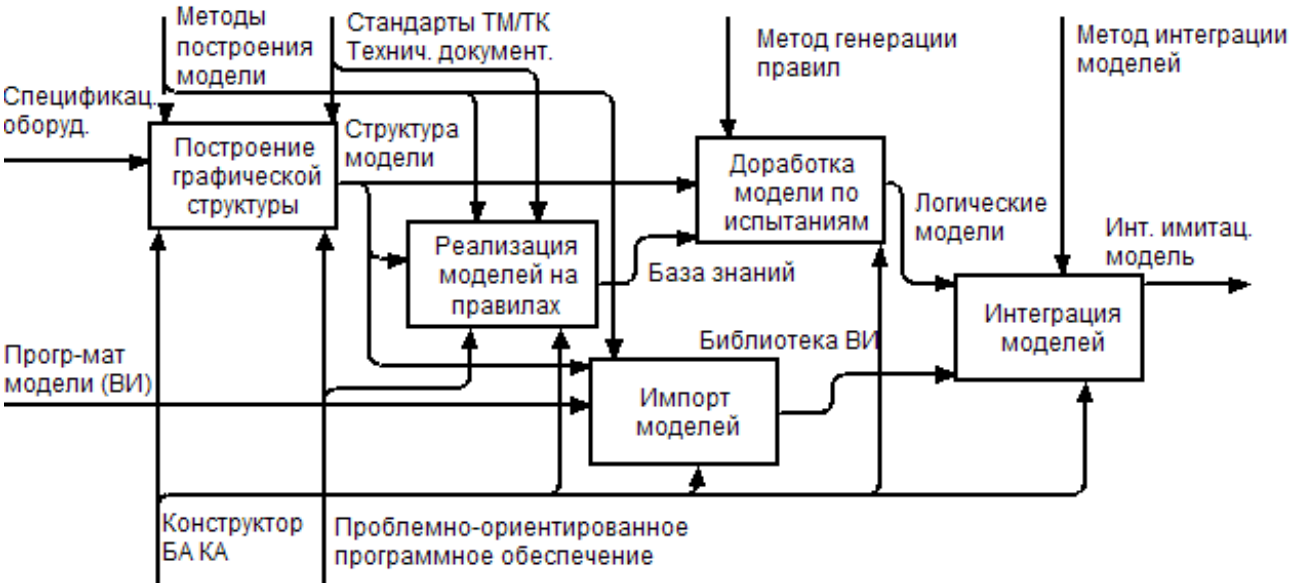

Рисунок 11 – Построение имитационной модели

Декомпозиция задачи «Проведение испытаний» показана на рисунке 12.

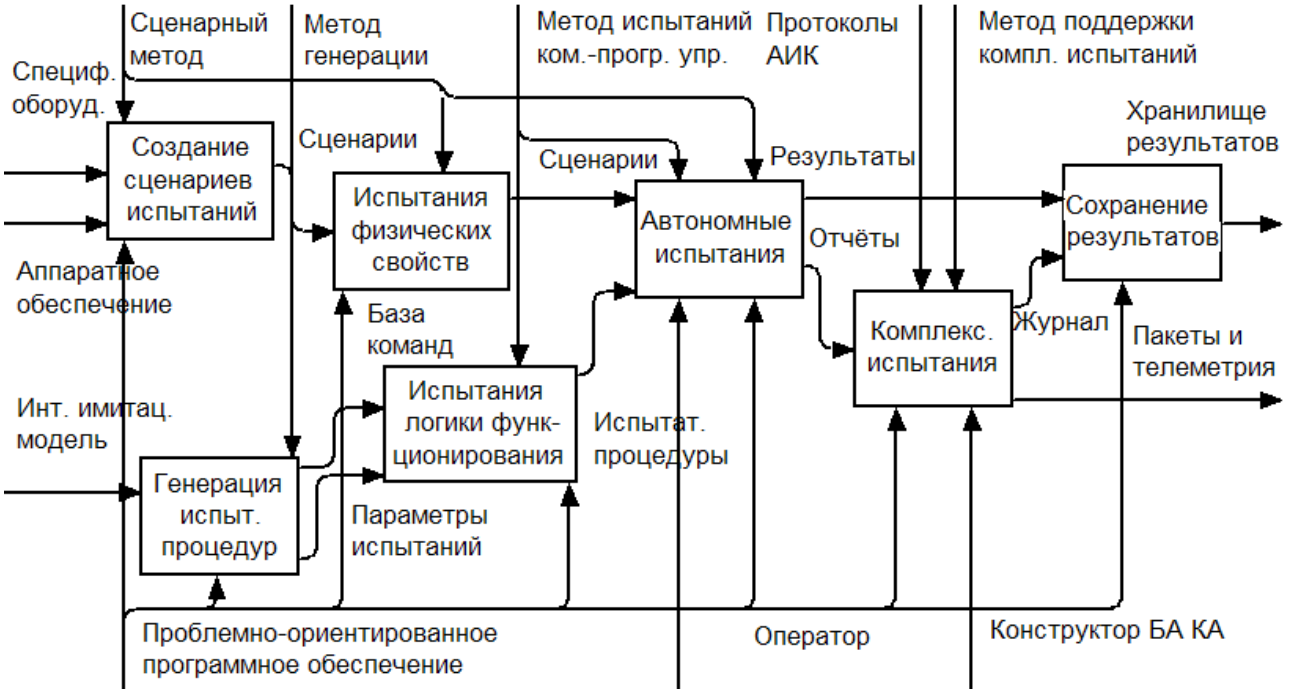

Рисунок 12 – Проведение испытаний

В проведение испытаний входят задачи создания сценариев, генерации испытательных процедур, подготовительные этапы испытаний, проведения автономных испытаний, комплексные испытания, сохранение и анализ результатов.

Апробация предложенной технологии выполнена для бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Технология может применяться для поддержки жизненного цикла сложных технических систем с командно-программным управлением.

Выполнено проектирование проблемно-ориентированных систем, которые позволяют решать новые функциональные задачи: формирование отраслевых баз знаний; построение интеллектуальных моделей функционирования бортовых систем, их интеграцию с программно-математическими моделями технических устройств; накопление и анализ результатов натурных испытаний, что обеспечивает применение концепции цифровых двойников в процессах проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов.

В пятой главе предлагаются проектные решения по созданию проблемно-ориентированной системы, обеспечивающей построение цифровых двойников функционирования бортовых систем космических аппаратов (Рисунок 13).

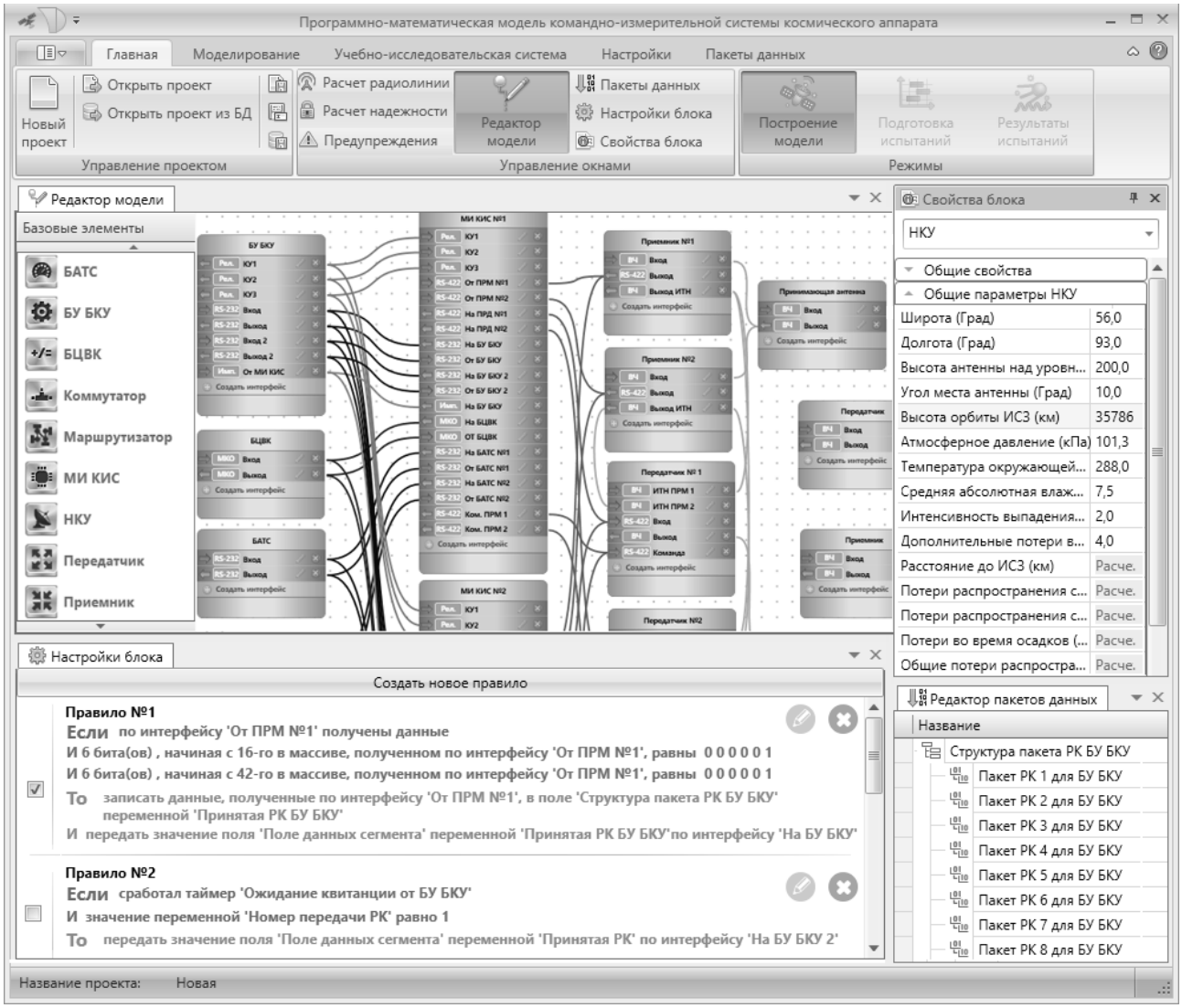

Рисунок 13 – Проблемно-ориентированная система ПММ БА КИС

ПММ БА КИС – «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» предназначена для моделирования функций бортовых систем, проведения имитационных экс-

периментов, подготовки испытаний, просмотра и анализа получаемых результатов. Предлагаются инструменты построения конфигурации элементов моделей и их коммутационных соединений, проектирования информационного взаимодействия, задания способов резервирования устройств с расчётом надёжности для разных типов резервов, задания характеристик и параметры функционирования оборудования. Выполнено проектирование инструментов для формирования функционального описания модели: редактор пакетов позволяет создавать структур пакетов команд и телеметрической информации (на основе стандартов CCSDS, ESA) и методы их наполнения данными и проверки; редактор правил позволяет создавать базы знаний, описывающие состояния элементов модели, входных интерфейсов, параметров, или таймеров и способы передачи данных, их обработки, изменения таймеров и значений переменных.

В шестой главе предлагаются проектные решения для создания проблемно-ориентированной системы для анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов (Рисунок 14).

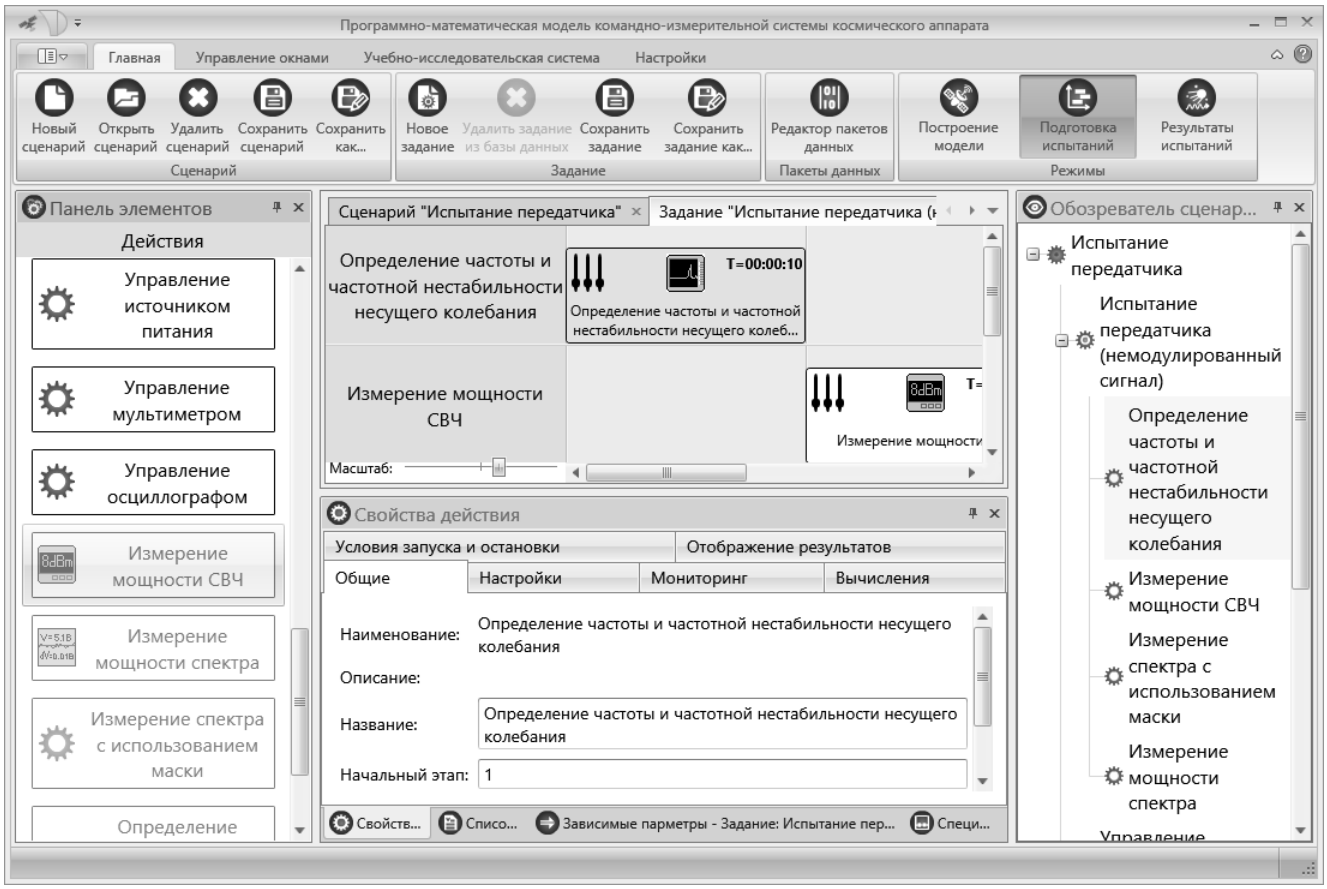

Рисунок 14 – Проблемно-ориентированная система ПО КПА КИС

ПО КПА КИС – «Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата». Выполнено проектирование инструментов для построения сценариев и проведения

испытаний: создание действий, построение заданий, определение параметров их выполнения, формирование из заданий сценариев, определение зависимостей циклов, взаимодействие с объектом контроля, визуализация и анализ результатов. Предложена схема взаимодействия с объектом контроля, обеспечивающая наполнение цифровых двойников актуальными данными натурных испытаний (Рисунок 15).

Рисунок 15 – Схема взаимодействия инструментов автономных испытаний

В сценарии входят действия, к которым подключаются виртуальные инструменты, реализующие взаимодействие испытательного оборудования КПА с объектом контроля, а также интеллектуальные модели для имитации функций сопряжённых устройств и анализа результатов испытаний (Рисунок 16).

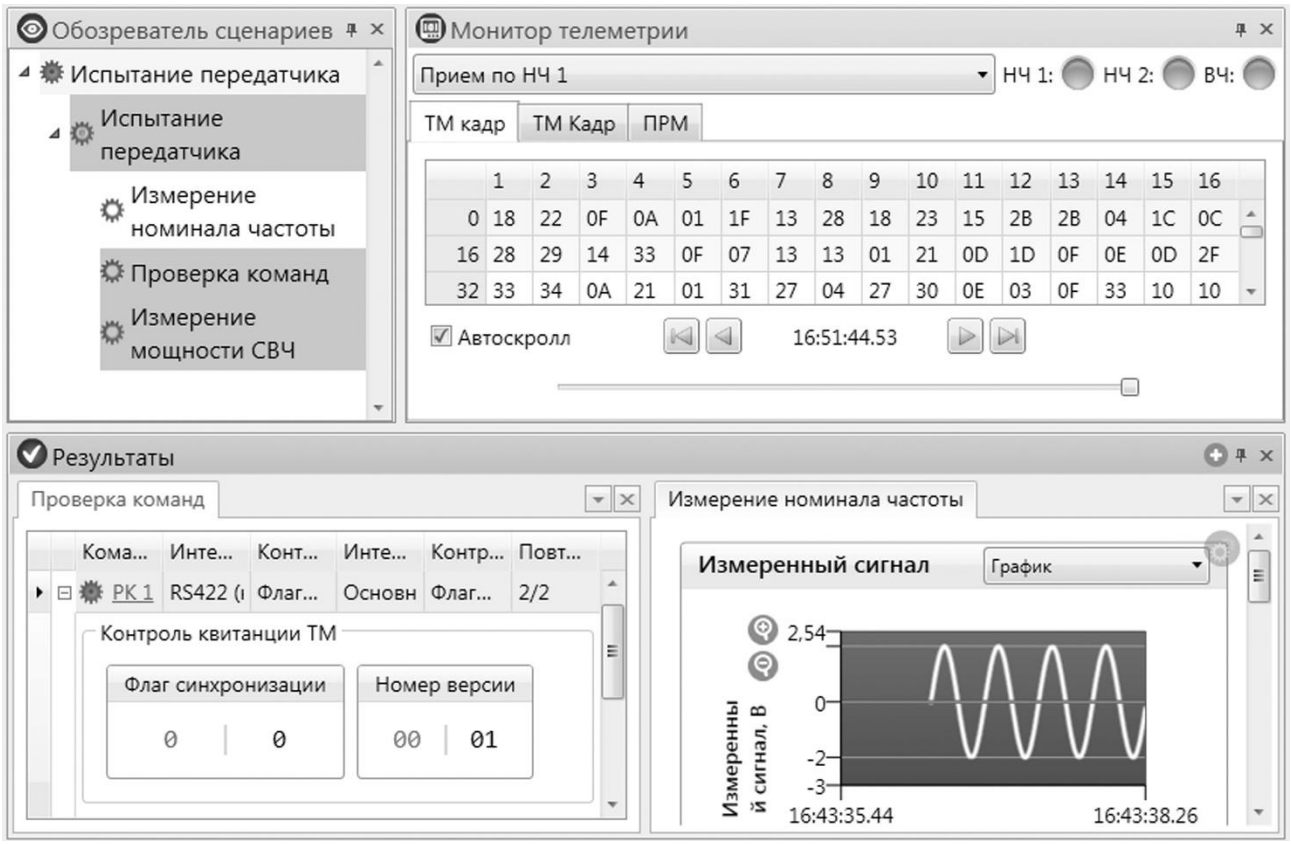

Рисунок 16 – Проведение испытаний и визуализация результатов

Инструменты проведения испытаний позволяют отображать сценарии ис-

пытаний, выполнять журналирование событий, мониторинг телеметрической информации и контроль данных. Интеллектуальные имитационные модели, реализующие концепцию цифровых двойников, применяются для формирования методик испытаний, контроля сценариев и анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования (Рисунок 17).

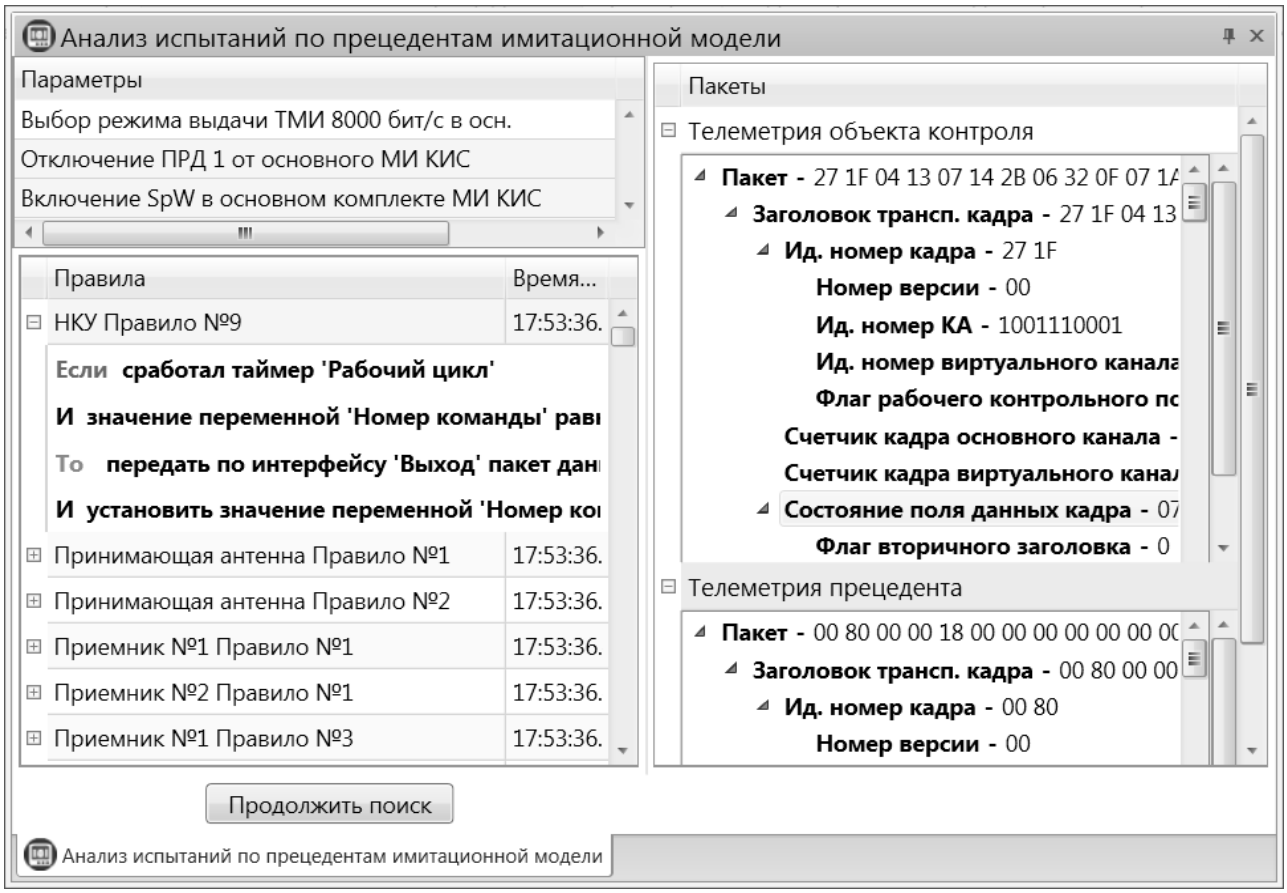

Рисунок 17 – Анализ результатов испытаний

В процессе испытаний в объект контроля и имитационную модель передаются команды управления, собираются реакции на поступившие команды от объекта контроля и от имитационной модели, выполняется их сопоставление, отображаются правила, описывающие действия модели и список ошибок при несовпадении результатов испытаний и результатов моделирования.

Проблемно-ориентированные системы – ПММ БА КИС и ПО КПА КИС, построенные на основе технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем, внедрены в АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва» при создании нового высокотехнологичного 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. Производство нацелено на обеспечение независимости от иностранных производителей аппаратуры и конкурентоспособность изготавливаемых устройств. В этой связи создание и внедрение научно-обоснованных технологических решений для его поддержки вносит значительный вклад в развитие космической отрасли страны. Системы упрощают и рационализируют процессы принятия решений конструкторами бортовой аппаратуры в новом производстве. Широкий спектр инструментов интеллектуального моделирования и проведения испытаний, развитые средства контроля моделей, сценариев испытаний и их результатов позволяют принимать обоснованные решения о соответствии проектируемого и изготовленного оборудования. Их применение является одним из факторов, обеспечивающих снижение финансовых затрат производства, т.к. поддерживаются работы по проектированию, испытаниям и интеграции БА КИС специалистами АО «ИСС», кроме того системы ориентированы на КПА, которое с минимальной перекомплектацией применимо для разных рабочих мест, программное обеспечение интероперабельно и взаимодействует с автоматизированным испытательным комплексом предприятия, что снижает расходы.

Выполнена оценка среднего времени решения типовых задач конструктором бортовой аппаратуры, возникающих в процессе производства командно-измерительных систем, показано сокращение времени в среднем на 30 % при применении проблемно-ориентированных систем ПММ БА КИС и ПО КПА КИС по сравнению с использованием существующей на предприятии системы испытаний, что достигается за счёт применения интеллектуальной имитационной модели. Правила функционирования модели автоматически переносятся в методы испытаний, модель позволяет контролировать полноту программ испытаний, модель повторяет цифровые интерфейсы оборудования и позволяет проверять устройства по заданной в модели конфигурации, элементы модели выступают имитаторами систем окружения при автономных испытаниях. Для подготовки испытаний, при которых требуется вводить большие объёмы команд, сокращение времени наблюдалось более чем в 2 раза за счёт генерации методов испытаний, использования специализированных структур, шаблонов и анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования. Предусмотренный в ПО КПА автоматический контроль сценариев испытаний, анализ результатов на граничные значения, поддержка длительных испытаний дают качественные преимущества по сравнению с применяемой на предприятии системой испытаний.

В **заключении** приведены основные выводы, научные и практические результаты, полученные автором и представленные в диссертационной работе.

1. Диссертационная работа представляет новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие космической отрасли страны.

2. Все результаты и положения, выносимые на защиту, опубликованы в российской и зарубежной печати, в том числе 21 публикаций в рецензируемых российских журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 18 в журналах, индексируемых в Scopus, Web of Science, 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

3. Цель диссертационной работы – повышение эффективности проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры за счёт создания технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников, достигнута в полном объёме и решены все задачи исследования, что подтверждается успешным опытом внедрения результатов на предприятии космической отрасли.

4. Проведённый анализ проблемы поддержки процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников и обзор существующих подходов и методов показали актуальность темы диссертационной работы и выбранных подходов к её решению.

5. Предложенная формализация понятия интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовой системы обеспечила применение формального подхода к созданию цифровых двойников, объединяющих базы знаний, виртуальные инструменты и результаты натурных испытаний на основе единого семантического представления элементов бортовой аппаратуры.

6. Новые методы построения интеллектуальных имитационных моделей упрощают создание базовых элементов цифровых двойников: выполняют поддержку построения моделей на основе эвристического поиска, формирование баз знаний на основе программ испытаний, структурно-графическое исследование моделей и анализ качества моделирования по результатам испытаний бортовой аппаратуры и обеспечивают поддержку проектирования бортовых систем космических аппаратов.

7. Новые методы анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов обеспечивают применение цифровых двойников на каждом шаге подготовки и проведения испытаний и позволяют по-новому решать задачи: построения сценариев испытаний, анализа полноты испытаний логики работы бортовых систем, применения имитаторов в процессе проведения испытаний, а

также анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования.

8. Новая технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем обеспечивает повышение эффективности процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов за счёт интеграции интеллектуальных, информационных и графических методов на основе концепции цифровых двойников.

9. Созданные проблемно-ориентированные системы позволяют решать новые функциональные задачи: формирование отраслевых баз знаний; построение интеллектуальных моделей функционирования бортовых систем, их интеграцию с программно-математическими моделями технических устройств; накопление и анализ результатов натурных испытаний. Их применение упрощает и рационализирует процессы разработки и испытаний бортовой аппаратуры за счёт применения концепции цифровых двойников для поддержки проектирования бортовых систем, построения испытательных процедур и анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования.

10. Внедрение новой технологии в АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва» при организации производства командно-измерительных систем космических аппаратов обеспечило повышение эффективности процессов производства и способствовало сокращению сроков проектирования, затрат на испытания и улучшению качества готовых систем.

11. Развитие и применение технологии, предложенной в работе, способствует цифровой трансформации производства, что в применении к широкому кругу задач проектирования, разработки и испытаний сложных технических систем обеспечит создание механизмов формирования и сохранения уникальных знаний специалистов предметной области, повышение эффективности и обеспечение обоснованности принимаемых ими решений и, как следствие, будет способствовать обеспечению технологических прорывов отечественного производства наукоёмкой продукции.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах их перечня ВАК РФ

1. **Исаева, О.С.** Метод структурно-графического анализа и верификации интеллектуальной имитационной модели / О.С. Исаева, Н.В. Кулясов, С.В. Исаев // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 50. С. 79-88.

2. **Исаева, О.С.** Интеллектуальный анализ испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата / О.С. Исаева, Л.Ф. Ноженкова, А.Ю. Колдырев // Вычислительные технологии. - 2019. - Т. 24, N 3. - С. 59-74.

3. **Исаева, О.С.** Системный подход к автоматизации испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата / О.С. Исаева // Автоматизация. Современные технологии. - 2019. - Т. 73, N 5. - С. 229-234.

4. **Исаева, О.С.** Технология построения комплексных моделей в инфраструктуре имитационного моделирования / О.С. Исаева // Информационные технологии. - 2018. - Т. 24, N 7. - С. 474-480.

5. **Исаева, О.С.** Разработка методики автоматизации испытаний на основе имитационной модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата / О.С. Исаева // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2018. - N 10(172). - С. 30-38.

6. **Исаева, О.С.** Проектирование метода формирования испытаний бортового оборудования космического аппарата с использованием базы знаний / О.С. Исаева // Информатизация и связь. - 2018. -N 5. - С. 62-67.

7. **Исаева, О.С.** Технология проектирования инфраструктуры имитационного моделирования на основе методологии SCRUM / О.С. Исаева // Информатизация и связь. - 2017. - N 4. - С. 250-256.

8. Ноженкова, Л.Ф. Инструменты компьютерного моделирования функционирования бортовой аппаратуры космических систем / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, А.А. Евсюков // Труды СПИИРАН. - 2018. -N 1(56). - С. 144-168.

9. Nozhenkova, L.F. Organization of complex testing of the spacecraft command and measuring system / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, A.Yu. Koldyrev // Сибирский журнал науки и технологий. - 2018. - Т. 19, N 3. - С. 510-516.

10. Ноженкова, Л.Ф. Разработка проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, А.А. Евсюков // Автоматизация. Современные технологии. - 2018. - Т. 72, N 7. - С.320-323.

11. Ноженкова, Л.Ф. Метод проблемно-ориентированной интеграции имитационных моделей / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева** // Информатизация и связь. - 2017. - N 4. - С. 124-128.

12. Ноженкова, Л.Ф. Автоматизация испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова,

О.С. Исаева, Р.В. Вогоровский // Автоматизация. Современные технологии. - 2017. - Т. 71, N 4. - С. 184-188.

13. Ноженкова, Л.Ф. Проектирование предметно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева** // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического ун-та им. ак. М.Ф. Решетнёва. - 2017. - Т. 18, N 3. - С. 538-544.

14. Ноженкова, Л.Ф. Компоненты унификации модели бортовой аппаратуры космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Е.А. Грузенко и др. // Современные наукоёмкие технологии. - 2016. - N 11-2. - С. 284-288.

15. Ноженкова, Л.Ф. Реализация технологии повторного использования имитационных моделей в инфраструктуре моделирования / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, А.А. Марков // Фундаментальные исследования. - 2017. - N 11-1. - С. 103-107.

16. Ноженкова, Л.Ф. Программная поддержка испытаний приема-передачи команд и анализа телеметрии в командно-измерительной системе / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Р.В. Вогоровский и др. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического ун-та им. ак. М.Ф. Решетнёва. - 2016. - Т. 17(4). - С. 997-1004.

17. Ноженкова, Л.Ф. Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Е.А. Грузенко // Вычислительные технологии. - 2015. - Т. 20, N 3. - С. 33-44.

18. **Исаева, О.С.** Моделирование и анализ функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / О.С. Исаева, Е.А. Грузенко, Р.В. Вогоровский и др. // Информатизация и связь. – 2015. - N 1. - С. 58-64.

19. Ноженкова, Л.Ф. Комплексная поддержка конструирования бортовых систем контроля и управления космических аппаратов на основе интеллектуальной имитационной модели / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Е.А. Грузенко и др. // Информационные технологии. - 2015. - N 9. - С. 706-714.

20. Ноженкова, Л.Ф. Построение программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Е.А. Грузенко // Информатизация и связь. - 2014. - В. 1. - С. 87-93.

21. Ноженкова, Л.Ф. Проектирование и разработка программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Е.А. Грузенко // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. ак. М.Ф. Решетнёва. - 2014. - N 2(54). - С. 114-119.

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

22. **Isaeva, O.S.** Technology of spacecraft on-board equipment design support / O.S. Isaeva // IOP Conf. Ser: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1047.

23. **Isaeva, O.** Graphical method of intellectual simulation models' analysis on the basis of technical systems' testing results / O. Isaeva, L. Nozhenkova, N. Kulyasov et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2020. - N 1295. - P. 368-376.

24. **Isaeva, O.** Graphical method for the knowledge base analysis of the simulation model / O. Isaeva, L. Nozhenkova, N. Kulyasov et al. // Proceedings of the 1st Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications. - CEUR-WS - 2020. V. 2727. - P. 25-33.

25. **Isaeva, O.S.** Automation of functional and measurement control of spacecrafts' command and measurement systems / O.S. Isaeva, L.F. Nozhenkova // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – IEEE, 2020.

26. **Isaeva, O.S.** Unified approach to building of information-and-measuring system / O. S. Isaeva // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. - IEEE. - 2019.

27. **Isaeva, O.S.** Automated support for spacecraft onboard equipment design on the basis of a heterogeneous model / O.S. Isaeva, A.Yu. Koldyrev, A.S. Chernigovskiy et al. // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - V. 1353, N. 1. - P. 012011.

28. **Isaeva, O.** Spacecraft onboard equipment testing automation technology on the basis of simulation model / O. Isaeva, L. Nozhenkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. Vol. 537.

29. Kulyasov, N. Method of creation and verification of the spacecraft onboard equipment operation model / N. Kulyasov, **O. Isaeva**, S. Isaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. Vol. 537.

30. Nozhenkova, L.F. Creation of the base of a simulation model's precedents for analysis of the spacecraft onboard equipment testing results equipment / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, A.Yu. Koldyrev // Advances in Intelligent Systems Research. - 2018. - Vol. 151. - P. 78-81.

31. Nozhenkova, L.F. Command and Software Management Simulation for the Spacecraft Equipment Testing / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, R.V. Vogorovskiy // 3rd Russ.-Pacific Conf. on Computer Technology and Applications. - 2018. - P. 1-4.

32. Nozhenkova, L.F. Architecture of the simulation modeling infrastructure based on the simulation model portability standard / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, E.A. Gruzenko //Advances in Intelligent Systems Research. - 2017. - N 141. - P. 125-128.

33. Nozhenkova, L.F. Problem-oriented integration of SMP-models in the simulation modeling infrastructure / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, E.A. Gruzenko, A.A. Markov //Advances in Intelligent Systems Research. - 2017. - Vol. 141. - P. 121-124.

34. Nozhenkova, L.F. Simulation infrastructure design on the basis of the space industry's international standards / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, A.A. Markov et al. // Advances in Intelligent Systems Research. - 2017. - Vol. 134. - P. 138-141.

35. Nozhenkova, L.F. Integration technology of the onboard equipment simulation models in simulation modeling infrastructure / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, E.A. Gruzenko et al. // DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. - 2016. - P. 618-622.

36. Nozhenkova, L.F. Automation of spacecraft onboard equipment testing / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, R.V. Vogorovskiy // AER-Advances in Engineering Research. - 2016. - Vol. 52. - P. 215-217.

37. Nozhenkova, L.F. Command and software control simulation for testing spacecraft onboard equipment / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, R.V. Vogorovskiy // DEStech Transactions on engineering and technology research. - 2016. - P. 349-353.

38. Nozhenkova, L.F. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the «Simulation Model Portability» standard / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, E.A. Gruzenko et al. // Advances in Intelligent Systems Research. - 2016. - Vol. 133. - P. 481-484.

39. Nozhenkova, L.F. Computer simulation of spacecraft onboard equipment / L.F. Nozhenkova, **O.S. Isaeva**, E.A. Gruzenko // ACSR-Advances in Computer Science Research. - 2015. - N 18. - P. 943-945.

Другие публикации по теме диссертации:

40. **Исаева, О.С.** Построение цифровых двойников на основе баз знаний для анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов / О.С. Исаева // Информатизация и связь. - 2021. - N 4. - С. 81-87.

41. **Исаева, О.С.** Создание гетерогенной имитационной модели командно-измерительной системы космического аппарата / О.С. Исаева, Л.Ф. Ноженкова, А.В. Мишуров и др. // Космические аппараты и технологии. - 2020. - N 4(2). - С. 107-115.

42. **Исаева, О.С.** Алгоритмы анализа испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата / О.С. Исаева, А.Ю. Колдырев // Информатика и системы управления. - 2019. - N 1(59). - С. 46-57.

Свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ:

43. **Исаева, О.С.** Инструменты испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата на основе имитационной модели. / О.С. Исаева, Л.Ф. Ноженкова, А.Ю. Колдырев. - М: Роспатент. - 2020. Свидетельство № 2020616059 от 08.06.2020 г.

44. **Исаева, О.С.** Интерактивные инфографические инструменты анализа модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата / О.С. Исаева, Л.Ф. Ноженкова, Н.В. Кулясов и др. - М: Роспатент. - 2020. Свидетельство № 2020616060 от 08.06.2020 г.

45. Ноженкова, Л.Ф. Программное ядро инфраструктуры имитационного моделирования. / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, А.А. Марков и др. - М: Роспатент. - 2020. Свидетельство № 2018610037 от 09.01.2018 г.

46. Ноженкова, Л.Ф. Редактор формирования процедур внешнего командно-программного управления для испытаний командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Р.В. Вогоровский и др. - М: Роспатент. - 2017. Свидетельство № 2017662761 от 16.11.2017 г.

47. Рябушкин, С.А. Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата (ПММ БА КИС). / С.А. Рябушкин, Л.Ф. Ноженкова, В.В. Сухотин, **О.С. Исаева** и др. - М: Роспатент. - 2015. Свидетельство № 2015661981 от 13.11.2015 г.

48. Рябушкин, С.А. Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата (ПО КПА КИС). / С.А. Рябушкин, Л.Ф. Ноженкова, В.В. Сухотин**, О.С. Исаева** и др. - М: Роспатент. - 2014. Свидетельство № 2014662250 от 26.11.2014 г.

49. Ноженкова, Л.Ф. Инструментальная среда имитационного моделирования программно-технических комплексов. / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Е.А. Грузенко и др. - М: Роспатент. - 2014. Свидетельство № 2014617786 от 04.08.2014.

50. Ноженкова, Л.Ф. Инструменты графического моделирования программно-технических комплексов / Л.Ф. Ноженкова, **О.С. Исаева**, Е.А. Грузенко и др. - М: Роспатент. - 2014. Свидетельство № 2014617411 от 21.07.2014.

Подписано в печать __.__.2021 Формат 60×84 1/16
Печать цифровая. Объем 2.5 п.л. Тираж 100 экз.
Отпечатано в Институте вычислительного моделирования СО РАН –
обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение 44