

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук”**



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

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук
Л.Ф. Ноженкова

Красноярск – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ	20
1.1. Анализ системной проблемы.....	20
1.1.1. Бортная аппаратура как сложная техническая система	20
1.1.2. Задачи моделирования в жизненном цикле бортовых систем космических аппаратов	26
1.1.3. Формальные признаки системной проблемы.....	33
1.2. Обзор существующих подходов к моделированию и анализу бортовых систем в жизненном цикле космических аппаратов	35
1.2.1. Концепция цифровых двойников как интегратор цифровой трансформации в космической отрасли	35
1.2.2. Технологии компьютерного моделирования в жизненном цикле бортовых систем космических аппаратов.....	38
1.2.3. Методы искусственного интеллекта для моделирования сложных технических систем	57
1.2.4. Технологии поддержки испытаний сложных технических систем ...	67
1.3. Задачи диссертационной работы	80
1.4. Выводы к главе 1	81
ГЛАВА 2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ЕЕ ПОСТРОЕНИЯ.....	85
2.1. Формализация понятия интеллектуальной имитационной модели.....	85
2.2. Свойства модели и операции над элементами модели.....	88
2.3. Семантическая интерпретация формального описания модели	90

2.4.	Эвристический метод построения модели	95
2.5.	Метод интеграции баз знаний и виртуальных инструментов в гетерогенной модели	101
2.6.	Формирование базы знаний по результатам испытаний бортовых систем космических аппаратов	103
2.7.	Структурно-графический анализ интеллектуальной модели	105
2.8.	Анализ надёжности конфигурации бортовых систем	109
2.9.	Анализ модели на основе результатов испытаний бортовых систем космических аппаратов	111
2.10.	Выводы к главе 2	114
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....		116
3.1.	Моделирование бортовых систем на основе логического вывода в базах знаний интеллектуальной имитационно модели	116
3.2.	Моделирование командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата	120
3.3.	Построение прецедентов имитационного моделирования	125
3.4.	Поддержка исследовательских задач	127
3.5.	Анализ функционирования бортовых систем космических аппаратов на основе интеллектуальной имитационной модели.....	130
3.5.1.	Постановка задачи испытаний бортовых систем.....	130
3.5.2.	Сценарный метод поддержки автономных испытаний	133
3.5.3.	Метод поддержки комплексных испытаний	141
3.5.4.	Метод поддержки испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой	148

3.6.	Формирование методики испытаний на основе базы знаний имитационной модели	150
3.7.	Метод анализа результатов испытаний на основе имитационного моделирования	152
3.8.	Выводы к главе 3	155
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ		157
4.1.	Концептуальные принципы построения новой технологии	157
4.2.	Состав методов новой технологии для моделирования и анализа	159
4.3.	Место новой технологии в задачах поддержки жизненного цикла бортовых систем	161
4.4.	Онтология поддержки жизненного цикла бортовых систем в составе новой технологии.....	163
4.5.	Структурно-функциональный анализ новой технологии	164
4.6.	Проектирование программных инструментов в составе новой технологии	173
4.7.	Выводы к главе 4	178
ГЛАВА 5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....		180
5.1.	Назначение и состав системы интеллектуального имитационного моделирования	180
5.2.	Построение информационно-графической модели бортовой аппаратуры космического аппарата	182
5.3.	Формирование структур и пакетов данных	184
5.4.	Создание правил функционирования имитационной модели	185

5.5.	Инструменты поддержки проектирования интеллектуальных имитационных моделей	188
5.6.	Структурно-графический анализ имитационной модели	193
5.7.	Имитационное моделирование функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата	197
5.8.	Интеграция виртуальных приборов в имитационную модель.....	199
5.9.	Примеры задач моделирования технических систем	200
5.10.	Анализ имитационной модели на основе испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата	201
5.11.	Формирование правил базы знаний на основе результатов испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата	202
5.12.	Технологические аспекты организации исследовательской среды.....	204
5.13.	Выводы к главе 5	206
ГЛАВА 6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ИСПЫТАНИЙ.....		208
6.1.	Назначение и состав программного обеспечения для поддержки испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата	208
6.2.	Подготовка испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата	212
6.2.1.	Создание базы данных для подготовки и проведения испытаний...	212
6.2.2.	Графическая реализация сценарного метода подготовки испытаний бортовой аппаратуры	213
6.2.3.	Подготовка испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата	215
6.2.4.	Интеграция метода испытаний командно-программного управления бортовых систем и сценарного метода испытаний	217

6.2.5. Генерация испытательных процедур на основе базы правил имитационной модели.....	218
6.3. Поддержка проведения испытаний бортовых систем космических аппаратов.....	220
6.3.1. Инструменты проведения испытаний и синхронизации данных.....	220
6.3.2. Мониторинг телеметрической информации	222
6.3.3. Испытания командно-программного управления бортовой аппаратурой	223
6.3.4. Анализ результатов испытаний бортовой аппаратуры по прецедентам имитационной модели	225
6.3.5. Поддержка проведения комплексных испытаний	227
6.4. Проектирование инструментов анализа и визуализации результатов испытаний	229
6.4.1. Просмотр процесса проведения испытаний.....	229
6.4.2. Просмотр результатов испытаний командно-программного управления	230
6.4.3. Визуализация результатов комплексных испытаний	231
6.5. Исследование эффективности новой технологии для поддержки проектирования разработки и испытаний бортовых систем.....	233
6.5.1. Внедрение новой технологии в производстве бортовой аппаратуры КИС КА.....	233
6.5.2. Оценка среднего времени решения типовых задач конструктором бортовой аппаратуры	235
6.5.3. Оценка методом анализа иерархий функциональных характеристик новой технологии	239
6.6. Выводы к главе 6	249

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	251
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	255
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	258
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ	297
1. Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата	297
2. Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата	299
3. Инструментальная среда имитационного моделирования программно-технических комплексов	301
4. Инструменты графического моделирования программно-технических комплексов	302
5. Редактор формирования процедур внешнего командно-программного управления для испытаний командно-измерительной системы космического аппарата.....	303
6. Программное ядро инфраструктуры имитационного моделирования..	304
7. Инструменты испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата на основе имитационной модели	305
8. Интерактивные инфографические инструменты анализа модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата	306
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Копии документов о внедрении результатов диссертационной работы и программного обеспечения	307
1. Акт об использовании результатов диссертации в АО «ИСС»	307
2. Акт об использовании результатов диссертации в СФУ	308
3. Акт о внедрении программного обеспечения в АО «ИСС».....	310

4. Акт о внедрении РИД ПО КПА КИС в ФГАОУ ВО «СФУ»..... 312
5. Акт о внедрении РИД «Инструментальная среда имитационного моделирования программно-технических комплексов» в «СФУ» 314
6. Акт о внедрении РИД «Инструменты графического моделирования программно-технических комплексов» в «СФУ»..... 315

ВВЕДЕНИЕ

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.

Бортовая аппаратура космического аппарата представляет собой комплекс сложных технических систем, основу которых составляют высокотехнологичные элементы и программное обеспечение. Широкий спектр назначений 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. 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 изготавливаемого 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.

Диссертационная работа посвящена созданию технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов, обеспечивающей построение и применение цифровых

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

двойников, объединяющих базы знаний, описывающие методы работы бортовой аппаратуры, виртуальные инструменты, представляющие собой программно-математические модели технических устройств, методы и результаты натурных испытаний для поддержки процессов создания сложных технических систем на основе интеллектуальных имитационных моделей. В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технологические решения, обеспечивающие эффективную поддержку производства бортовой аппаратуры за счёт повышения качества проектирования и испытаний бортовых систем космических аппаратов, реализация которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Степень разработанности темы. 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.

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. Инфраструктуры 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. и др. 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.

Несмотря на существование разнообразных подходов, имитационные модели лишь ограниченно применяются для подготовки испытаний и анализа функционирования бортовых систем. Применение моделей для наглядного построения испытательных процедур, контроля логических правил приёма, передачи и обработки специализированных данных является трудоёмкой и зачастую невыполнимой задачей. Обзор показывает, что необходимо развитие цифровых технологий и их интеграции для построения и применения базовых компонент цифровых двойников при проектировании, разработке и испытаниях бортовых систем космических аппаратов. Создание новой технологии построения, интеграции и применения базовых компонент цифровых двойников для поддержки проектирования и анализа функционирования бортовых систем является актуальным направлением научных исследований.

Диссертационное исследование выполнено в рамках ряда научных программ РАН, грантов, а также научно-исследовательских и опытно-конструкторских 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 аналитической обработки данных и технологии создания интегрированных информационно-управляющих 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. 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»;

4. 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.;

5. НИОКР «Модернизация и внедрение подсистемы приёма 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.;

6. 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.);

7. 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.).

8. Работа поддержана 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, интел-

лектуального 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 интеллектуаль-

ных, 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 космической 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 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.

Работа выполнена в Институте вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН.

Благодарности. Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность научному консультанту доктору технических наук профессору Ноженковой Людмиле Фёдоровне за всестороннюю помощь в работе над диссертацией, Рябушкину Станиславу Анатольевичу (АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»), коллективу отдела прикладной информатики и отдела информационно-телекоммуникационных технологий Института вычислительного моделирования СО РАН, коллективу кафедры «Радиоэлектронные системы» Сибирского федерального университета за существенный вклад в работу.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

1.1. Анализ системной проблемы

1.1.1. Бортовая аппаратура как сложная техническая система

Обеспечение целевых функций космических проектов решается комплексом взаимосвязанных орбитальных и наземных технических средств, в состав которых входят бортовая аппаратура космического аппарата и наземный комплекс управления (ГОСТ Р 53802-2010). Задачи конструктора бортовой аппаратуры включают проектирование и контроль методов функционирования бортовых систем и методов взаимодействия с наземными техническими средствами.

Бортовая аппаратура (БА) космического аппарата – это совокупность электрических, электромагнитных, электронных и оптических приборов и устройств, размещаемых на борту космического аппарата. Основу её составляют высокотехнологичные элементы и программное обеспечение (ПО). Как отмечено в [223] бортовая аппаратура представляет собой сложную техническую систему, где «сложность» [169] определяется значительным числом входящих в её состав компонентов, связанных между собой множеством связей различной природы, а также сложным поведением, которое трудно предсказать или описать аналитически [133]. Каждый из компонентов системы состоит из множества приборов, агрегатов, датчиков [223], имеющих большое число параметров, режимов работы и команд управления. Сложное поведение затрудняет проектирование и создание бортовой аппаратуры космического аппарата, особенно в случаях, когда речь идёт не о серийном производстве, а о научно-исследовательских и опытно-конструкторских изысканиях.

Существенными для исследования являются следующие характеристики бортовой аппаратуры как сложной технической системы: значительное число компонентов со множеством связей, режимов работы и команд управления; сложное поведение, которое трудно описать аналитически; трудности построения уни-

версальных проектных решений; отсутствие унифицированных протоколов, структур данных и подходов к информационному взаимодействию. Вытекающие из всего этого высокая стоимость ошибок и существенные трудозатраты при экспериментальных исследованиях готовых систем делают актуальной проблему создания новых методов и технологий поддержки научно-технических разработок перспективной космической техники на основе моделирования функционирования бортовой аппаратуры.

В научных источниках рассмотрен состав систем, обеспечивающих выполнение задач управления космическим аппаратом, контроля и поддержания его технических и баллистических характеристик. К ним относятся наземные и бортовые системы управления, линии связи между ними и внутри них и программное обеспечение. Ключевые бортовые системы – бортовой комплекс управления, приёмные устройства, система сбора и формирования телеметрической информации и передающие устройства. Наземные системы включают центр управления полётом, наземные командно-измерительные станции, станции приёма телеметрической информации, корреляционно-фазовые пеленгаторы, системы связи и передачи данных [120, 176]. Для поддержки работоспособности космического аппарата и выполнения им целевых программ бортовыми системами решается широкий круг задач, в их числе [129]: обеспечение обмена информацией с наземным сегментом управления; измерение текущих навигационных параметров движения космического аппарата на орбите; сбор, хранение, обработка и передача телеметрической информации; управление работой бортовых систем космического аппарата; сверка, коррекция и фазирование бортовой шкалы времени.

Управление космическим аппаратом выполняется на основе командно-программного метода, при котором применяются или команды прямого действия, направленные на непосредственное исполнение в бортовых системах, или массивы командно-программной информации, закладываемые в память бортовых систем [132]. Управление понимается, в широком смысле, как совокупность операций оценки состояния движения и аппаратуры космического аппарата, принятия решения и выработки управляющих воздействий и собственно передачи на кос-

мический аппарат сигналов управления [120]. Для управления космическим аппаратом необходимы система передачи команд управления от наземного комплекса к бортовой аппаратуре, система передачи телеметрической информации (ТМИ) от бортовой аппаратуры в наземный комплекс и система измерения текущих навигационных параметров. К таким параметрам относят дальность космического аппарата относительно центра управления полётом (ЦУП) и его скорость [62]. За все вышеперечисленные функции отвечает основной элемент радиотехнической системы управления космическим аппаратом (КА) – бортовая аппаратура командно-измерительной системы (БА КИС) космического аппарата [15, 62, 104, 189]. Она играет важнейшую роль в успешности осуществления миссии, возложенной на космический аппарат в целом [30, 132].

Командно-измерительная система состоит из радиотехнических средств наземного автоматизированного комплекса управления и бортовой аппаратуры космического аппарата [32]. В область применения командно-измерительных систем входят информационное обеспечение запусков космической техники, работа в области дальнего и ближнего космоса, как на пилотируемых, так и беспилотных аппаратах [169]. Каждая из областей накладывает свою определённую специфику на состав и методы функционирования командно-измерительных систем. В [15] представлен пример разработки малогабаритной бортовой аппаратуры командно-измерительной системы, в основе разработки которой лежат открытые стандарты организации командной радиолинии управления, разработанные международным консультативным комитетом по космическим системам передачи данных – CCSDS и Европейским космическим агентством – ESA [316, 349].

Между бортовыми и наземными системами циркулируют разовые команды, программные команды, командно-программная информация, информация функционального контроля, баллистическая и телеметрическая информация. Связь осуществляется по двум радиолиниям – запросной и ответной. По запросной радиолинии от наземного сегмента передаются команды и командно-программная информация. По ответной радиолинии от космического аппарата поступает телеметрическая информация, которая позволяет анализировать состояние бортовой

аппаратуры, результативность выполнения программ её работы и оценивать реакции на управляющие воздействия. Сбор, обработка, сжатие, хранение и выдача по требованию наземной станции телеметрической информации является одной из важнейших задач бортовой аппаратуры [176].

За осуществление командно-телеметрического взаимодействия бортовых и наземных систем отвечает командно-измерительная система. В [97] описан процесс приёма и обработки телеметрической информации в программном обеспечении наземного комплекса управления. Он осуществляется следующим образом: бортовой комплекс управления по радиоканалу передаёт радиосигнал на Землю в командно-измерительную систему, командно-измерительная система принимает радиосигнал, преобразует его в цифровой сигнал и транслирует далее в центр управления полётами, в центре управления полётами сервер телеметрической информации принимает поток данных, обрабатывает его, проверяет достоверность и организует архивы. Для просмотра обработанной телеметрической информации к телеметрическому серверу подключаются дополнительные программные комплексы – ТМ-клиенты.

Современная командно-измерительная система представляет собой сложный комплекс технологических и вспомогательных подсистем, объединённых общей системой управления и функционирующих в непрерывном взаимодействии с бортовыми системами. Командно-измерительная система состоит из устройств приёма данных, передачи данных и интерфейсного модуля, предназначенного для анализа и выполнения команд. Рассмотрим схему функционирования командно-измерительной системы (Рисунок 1), которая показывает обобщённый уровень информационного взаимодействия наземных и бортовых систем.



Рисунок 1 – Схема функционирования КИС

Команды на изменение конфигурации или настроек командно-измерительной системой выполняются ею самой, команды для осуществления внешнего командно-программного управления передаются в бортовые системы (БЦВК – бортовой цифровой вычислительный комплекс или БУ БКУ – блок управления бортового комплекса управления). В соответствии с заданным временем ожидания квитанции интерфейсный модуль формирует квитанцию о выполнении команды либо на основе собственной информации о прохождении команды, либо по данным, полученным от бортовых систем. За формирование телеметрической информации отвечает бортовая аппаратура телесигнализации (БАТС). Результаты отработки команд отражаются в телеметрии и в квитанции, передаваемой в наземный сегмент.

Если выполнить детализацию информационной инфраструктуры, дополнив схему функционирования КИС резервными устройствами и дублирующими каналами связи, то сложность её анализа существенно возрастает (Рисунок 2). По каждому из каналов для каждого из устройств передаются сотни команд, таким образом, если эту схему расписать на уровень команд, то выполнять анализ информационно-коммуникационного взаимодействия без специализированных средств моделирования становится невозможно.

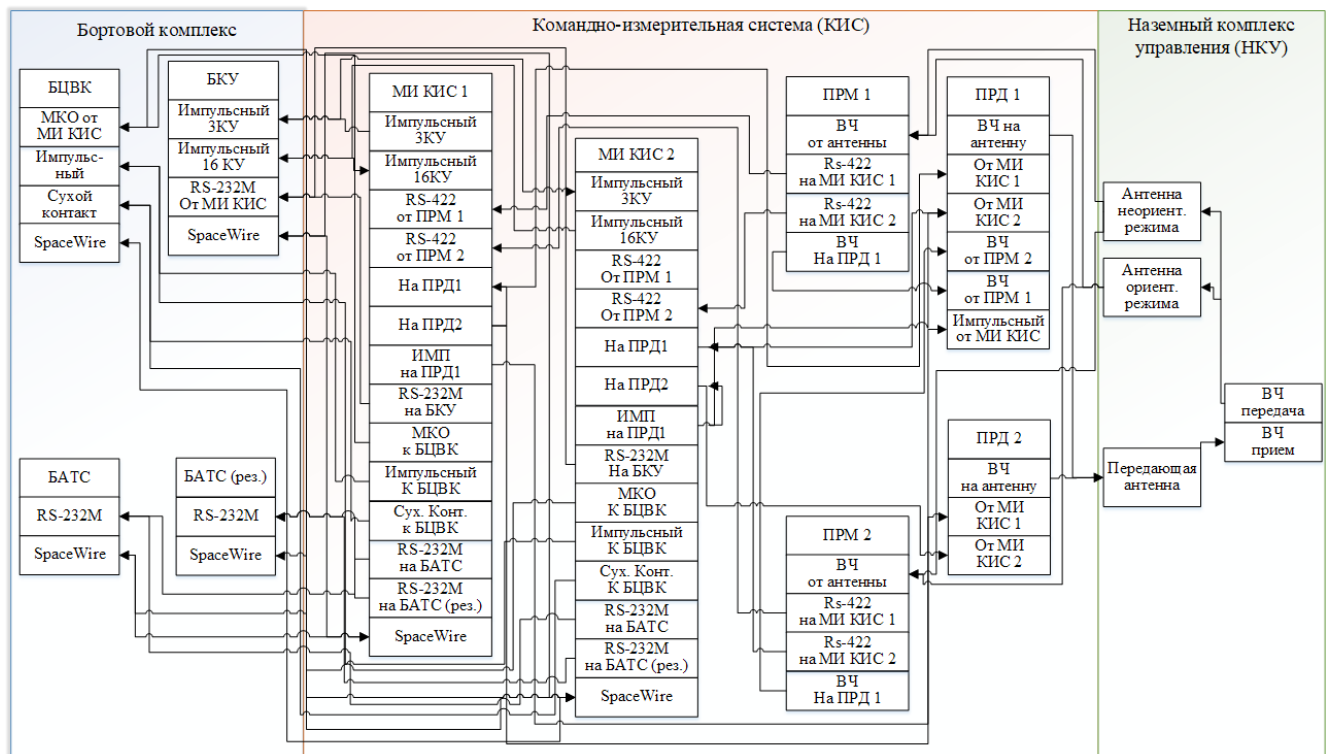


Рисунок 2 – Развёрнутая схема функционирования КИС

Специалисту предметной области требуется проектировать и испытывать не только команды, квитанции, ответы в телеметрии, но правильные последовательности выполнения этих команд, нарушение которых может привести к проблемам управления. Разработка способов организации взаимодействия бортовых подсистем и вариантов реализации их функционирования характеризуется большой вариативностью. Командно-телеметрическое взаимодействие выполняется на основе разных подходов, протоколов связи и структур данных. Интуитивные и недостаточно обоснованные проектные решения могут привести к грубым просчётам и снижению надёжности проектируемых систем. Современные требования к космическим системам обуславливают необходимость поиска новых подходов к созданию бортовых систем, формированию научно-технического задела для разработки перспективной космической техники, конкурентоспособной на мировом рынке [229]. Требуются технологии, которые позволят имитировать сложное поведение исследуемых систем на основе знаний специалистов предметной области.

1.1.2. Задачи моделирования в жизненном цикле бортовых систем космических аппаратов

Современные методы производства бортовых систем космических аппаратов требуют проведения целого комплекса междисциплинарных исследований, обеспечивающих поддержку процессов проектирования, разработки бортовых систем и анализа готовых решений. Остро стоит вопрос создания единого информационного пространства для предприятий космической отрасли в рамках реализации принятой Роскосмосом концепции информатизации [44], которое бы позволило выполнять поддержку изделий на всех стадиях жизненного цикла. В этой связи необходим целенаправленный системный подход, который должен сопровождать как задачи производства систем от выбора характеристик устройств до финишных этапов ввода их в эксплуатацию, так и позволять решать макрозадачи анализа перспектив развития космической техники и создания процессов управления производственной деятельностью [235]. Такой подход способствует формированию методологических основ для международного сотрудничества, обеспечению импортонезависимости и конверсии производства, выбору конкретных форм рациональной организации работ по созданию космических систем [48].

В реализации системного подхода значительная роль отводится применению методов поддержки жизненного цикла производства, основанных на компьютерном моделировании сложных технических систем. Стандарты Европейского космического агентства [335, 336, 337] определяют этапы жизненного цикла разработки, которые присутствуют как в производстве отдельных технических устройств, так и в создании крупных проектов:

- Этап 0 – Анализ целей проекта;
- Этап A – Оценка выполнимости проекта;
- Этап B – Предварительное проектирование;
- Этап C – Детальное проектирование;
- Этап D – Производство;
- Этап E – Использование;

Этап F – Утилизация.

Этапы 0, А, В в основном ориентированы на разработку системы функциональных и технических требований для соответствия целям проекта, с учётом существующих технических и программных ограничений. На данных этапах определяются все виды деятельности и ресурсы, которые будут использованы для разработки космического и наземного сегментов. Производятся оценки технических и программных рисков. Выполняется предварительное проектирование.

Этапы С и D включают в себя мероприятия, которые проводятся в целях развития и подготовки космического и наземного сегментов и их производства.

Этап Е включает все мероприятия, которые будут проводиться в порядке запуска, приёмки, использования и обслуживания орбитальных элементов космического сегмента, а также соответствующего наземного сегмента.

Этап F включает в себя все мероприятия, которые будут проводиться в целях безопасного удаления всех продуктов, запущенных в космическое пространство, а также наземного сегмента.

Несмотря на многообразие применяемых подходов для поддержки деятельности специалистов в космической отрасли, обусловленных многообразием решаемых объектами ракетно-космической техники задач научного, социально-экономического и оборонного характера [181] жизненный цикл разработки одних проектов от других мало чем отличается. Жизненный цикл включает организацию действий на этапах инициализации проектов, их выполнения и закрытия. Процессы поддержки жизненного цикла, широко описанные в руководствах по передовым методам управления проектами [343], соответствуют требованиям, предъявляемым к сопровождению космических проектов [246]. На этапах спецификации системная разработка выполняется сверху вниз, от целей и функций всей системы до задач отдельных подсистем. Дальнейшие этапы используют подход снизу вверх, то есть строительство составных частей систем начинается с низкого уровня, а затем постепенно они интегрируются до уровня системы в целом, тестируются их взаимные связи и комплексные функции. Подход сверху вниз, а затем снизу вверх называют V-моделью поддержки жизненного цикла [320].

В случае серийного производства существуют технологии, позволяющие снижать трудозатраты, в их числе CALS-технологии [165] (CALS – Continuous Acquisition and Life-cycle Support), которые определяют использование компьютерной техники и информационных систем на всех стадиях жизненного цикла изделия. Они позволяют обеспечивать единообразные способы управления процессами и взаимодействия всех участников разработки и электронного обмена данными. Технологии интеграции данных реализуются с помощью PDM-систем управления данными (Product Data Management) [165]. Такие системы предоставляют методы сбора, структурирования и хранения информации об изделии и взаимодействуют с компьютерными системами, создающими или использующими эти данные. Для управления жизненным циклом изделий строятся PLM-системы (Product Lifecycle Management). PLM-системы обеспечивают управление всей информацией об изделии, начиная с проектирования и производства и заканчивая снятием с эксплуатации. Кроме того, на производстве используются разнообразные CAE (Computer Aided Engineering), CAD (Computer Aided Design) и CAM (Computer Aided Manufacturing) [326] системы, автоматизирующие процесс создания технической документации и производства изделий [30]. Эти системы обеспечивают удобный сбор, систематизацию документов и поддержку быстрого направленного поиска информации в больших объёмах данных.

В случае, когда речь идёт о создании сложной высокотехнологичной несерийной продукции, применение существующих PLM-систем управления жизненным циклом становится не эффективным, ввиду слабой структурированности и неполноты знаний о задаче. Требуются новые технологии поддержки проведения исследований, позволяющие исследовать структуру и динамику функционирования технических систем [125]. В основе решения указанных задач лежат имитаторы систем, на которых будут формулироваться гипотезы, и проводиться эксперименты для проверки этих гипотез. Совершенствование системного проектирования требует более широкого использования разнообразных моделей, которые, в этом случае, представляют собой системный, согласованный между разработчиками и специалистами предметной области, способ структуризации информации

и знаний, отражающий сущность организации и функционирования предметной области [356].

На каждом этапе жизненного цикла выделяются инженерные и эксплуатационные задачи, требующие применения различных технологий моделирования (Таблица 1).

Таблица 1 – Инженерные и эксплуатационные задачи

→ Жизненный цикл →					
→ Инженерные и эксплуатационные задачи					
Этап 0	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Этап 4	Этап 5-6
Анализ целей	Оценка выполнимости	Предварительное проектирование	Детальное проектирование	Производство	Эксплуатация/ Утилизация
Анализ выполнимости целей / Оценка компромиссов					
Проектирование технических требований					
	Проверка работоспособности проекта				
		Проверка подсистем, интерфейсов и бортового программного обеспечения			
			Интеграция и проверка сборки		
			Обучение, диагностика неисправностей		
				Приёмка и обслуживание	

К таким задачам относятся [336]: технико-экономическое обоснование и анализ выполнимости целей проекта, разработка требований и спецификаций, проверка проекта, подготовка космического и наземного сегмента, создание процедур испытаний, функциональная проверка, обучение персонала, эксплуатация, диагностика и устранение неисправностей.

Для определения круга задач цифровой поддержки несерийного производства бортовых систем рассмотрим процессы проектирования, разработки и испытаний в жизненном цикле бортовых систем на предприятии космической отрасли. Схематично обозначены задачи конструктора бортовой аппаратуры, используемые инструменты и информационные ресурсы (Рисунок 3).

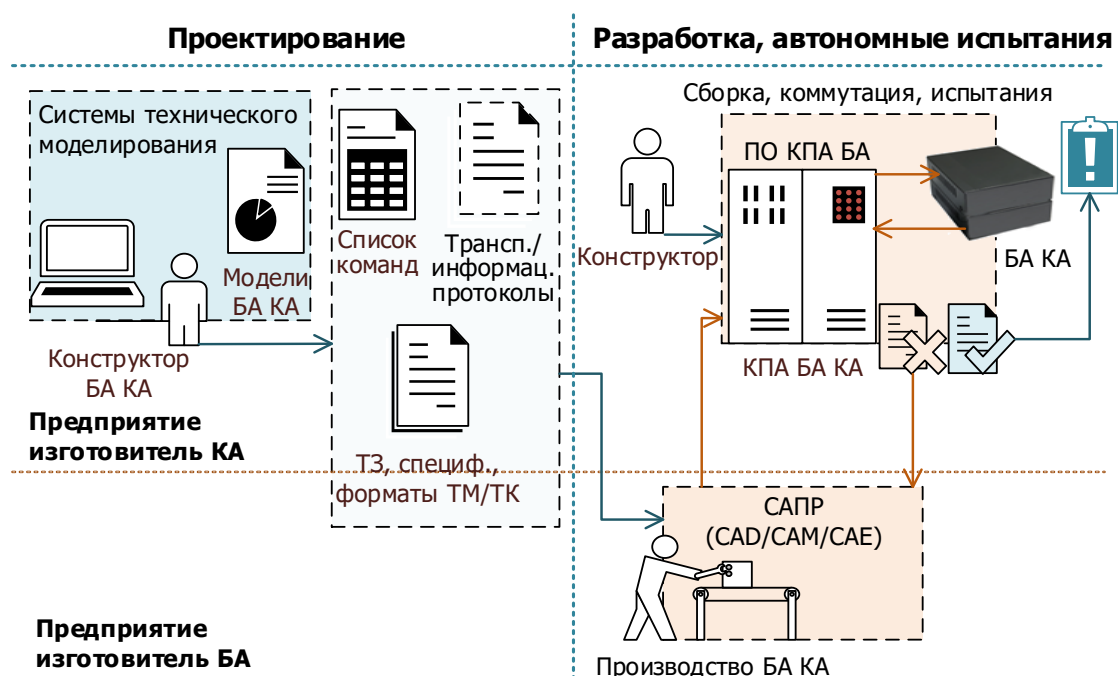


Рисунок 3 – Схема поддержки производства бортовой аппаратуры

Построенная схема применяется при создании сложных технических устройств, имеющих собственную логику работы и управляемых командно-программным методом. В задачи конструктора бортовой аппаратуры входит проектирование физических параметров функционирования устройств и методов их взаимодействия с сопряжёнными системами для обеспечения командно-программного управления космическим аппаратом. Существует целый ряд систем технического моделирования, которые позволяют применять модели для определения технических характеристик бортовых систем. Применение универсальных систем для моделирования логики информационного взаимодействия бортовой аппаратуры требует построения сложных графических моделей, не обеспечивает работу со специализированными структурами данных и может потребовать написания дополнительных программ на языке программирования. Из-за описанных ограничений универсальные системы для таких задач не применяются, что затрудняет проверку корректности форматов ТМ/ТК, команд и последовательностей их выполнения. Требуются новые проблемно-ориентированные программные решения, предоставляющие удобные и наглядные инструменты, которые позволят выполнять проектирование сложных нелинейных методов информационно-

го взаимодействия, создавать и анализировать построенные модели и использовать в работе специализированные форматы и структуры данных. Такие программные инструменты должны не только обеспечить работу с существующими моделями физических устройств, но и применять знания специалистов предметной области для тех задач, где невозможно построить математическую модель. Наиболее удобным инструментом для представления и использования знаний специалистов предметной области являются методы искусственного интеллекта. Построение баз знаний и программного обеспечения на их основе для интеллектуального имитационного моделирования отвечает современным тенденциям развития технологий цифровой поддержки производства и обеспечит повышение эффективности решения задач проектирования бортовых систем и анализа проектных решений.

Результатом проектирования является техническая документация: технические задания на составные части устройств, форматы телеметрической информации и структуры телекоманд, транспортный и информационный протоколы и др. На основании подготовленных конструктором материалов выполняется изготовление составных блоков бортовой аппаратуры. При этом предприятие-изготовитель бортовой аппаратуры создаёт контрольно-проверочную аппаратуру (КПА) и программное обеспечение, при помощи которых выполняются автономные испытания. Такое программное обеспечение узко специализировано на конкретный объект контроля, не содержит в своём составе методов автоматизации подготовки испытаний, не поддерживает работу с имитационными моделями, построенными в системах технического моделирования, или собственных имитационных инструментов. Их применение не позволяет провести независимые испытания, поскольку ПО КПА настроено на рассматриваемый объект контроля, при отсутствии моделей роль систем окружения выполняет программное обеспечение, в которое заложены ответы бортовых систем и всесторонний анализ сложных режимов работы оборудования в этом случае не выполняется. Испытания логики работы бортовых систем происходят во время комплексных испытаний, когда бортовая аппаратура собирается в комплексы систем. Схематично задачи под-



Контрольно-проверочная аппаратура и программное обеспечение производителя бортовой аппаратуры выступают в качестве средства информационного взаимодействия между объектом контроля и универсальным испытательным комплексом, который в соответствии с транспортным и информационным протоколами посылает пакеты команд, получает данные и выполняет анализ функционирования бортовых систем. На данном этапе выявляются ошибки, возникающие при взаимодействии бортовых систем с системами окружения, и при их обнаружении требуется определить, в каком из устройств комплекса возникли проблемы. Это наиболее дорогостоящий и трудоёмкий вид испытаний, при котором выявленные проблемы увеличивают сроки изготовления оборудования и вносят существенный вклад в его стоимость. Независимые КПА и ПО КПА, в том числе использующие модели – имитаторы окружения бортовых систем позволили бы сводить к минимуму обнаружение ошибок во время комплексных испытаний, переместив вектор основных исследований на начальные этапы.

Таким образом, для эффективной поддержки специалиста, принимающего решения при производстве бортовых систем, требуется обеспечить его деятельность проблемно-ориентированными программными инструментами на основе методов интеллектуального имитационного моделирования. Моделирование позволит заменить дорогостоящее экспериментальное апробирование конструкторских решений и построенных систем на исследование результатов имитационных экспериментов. Такие программные инструменты должны позволять строить интеллектуальные имитационные модели, интегрировать в их состав виртуальные приборы, создавать специализированные структуры данных и команды управления, проводить имитационные эксперименты для анализа проектируемого взаимодействия бортовых систем и использовать построенные модели, структуры и базы данных для исследования изготовленных устройств. Такое решение возможно лишь на основе тесной интеграции методов моделирования, графической визуализации, интеллектуальной поддержки, автоматизации испытаний, организации хранения, обработки, анализа данных. Применение указанных подходов в комплексе обеспечит синергетический эффект от использования технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем на этапах жизненного цикла производства космических аппаратов.

1.1.3. Формальные признаки системной проблемы

Задачи повышение эффективности поддержки производства бортовых систем порождают *актуальную системную проблему*, решение которой связано с созданием новых подходов к моделированию и анализу функционирования бортовых систем, обеспечивающему построение и применение базовых компонент технологии цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла – при проектировании и проведении испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Комплексность системной проблемы обусловлена тем, что для её решения требуется интеграция интеллектуальных, информационных и графических методов в рамках единого технологического решения. Применение комплекса мето-

дов, направленных на исследование системной проблемы [208], обеспечивает синергетический эффект интеграции системных подходов к моделированию и автоматизации испытаний и способствует сохранению и преемственности информационных и функциональных ресурсов.

Неоднозначность обусловлена большим числом вариантов функционирования бортовых систем, для оценки которых применяются неформализованные методы научного исследования. В данной работе предлагается использовать методы проведения имитационных экспериментов для поддержки исследования альтернативных вариантов работы систем. Моделирование позволит заменить дорогостоящие и ресурсоёмкие экспериментальные отработки, предназначенные для апробирования конструкторских решений, на исследование результатов имитационных экспериментов.

Многоаспектность. Поддержка производства бортовых систем космических аппаратов – сложный процесс, требующий применения междисциплинарных подходов на основе технологий моделирования, графической визуализации, автоматизации испытаний, хранения и обработки данных и пр.

Слабая формализуемость обусловлена существенными системными трудностями, сопровождающими реализацию конструкторских проектов в космической отрасли, связанными с недостатком достоверных исходных данных, отсутствием типовых моделей как самой системы, так и её подсистем, отсутствием информационной поддержки в виде отечественных стандартов и технической документации, дефицитом квалифицированных опытных конструкторов, отсутствием широкого выбора компонентной базы отечественного производства, сложностью взаимодействия с зарубежными партнёрами и др.

Неопределённость заключается в отсутствии или недостатке достоверных данных, представляющих содержательную сторону проблемы. Проблема описывается отдельными сценариями развития событий, в которых нет исчерпывающих данных о взаимосвязях между событиями. Для решения этой проблемы в данном исследовании применяются методы искусственного интеллекта, основанные на формализованном опыте специалистов-экспертов в предметной области. Методы

искусственного интеллекта помогают в решении слабоформализуемых задач с неполными исходными данными [61]. Такой подход получил широкое применение в различных системах проектирования и технического конструирования, он позволяет не только получать качественные решения, но и обмениваться знаниями между группами инженеров, имеющих большой опыт в различных аспектах решаемых задач [275]. В этом случае база знаний представляет собой хранилище функциональных и технологических процессов, позволяющее не только наблюдать, но и управлять принятием решений [340].

1.2. Обзор существующих подходов к моделированию и анализу бортовых систем в жизненном цикле космических аппаратов

1.2.1. Концепция цифровых двойников как интегратор цифровой трансформации в космической отрасли

Создание космических аппаратов – это наукоёмкий и дорогостоящий процесс, связанный с множеством разнообразных и нередко трудно формализуемых факторов, требующий применения методов моделирования, исследования моделей, анализа функционирования изготовленного оборудования, поддержки принятия решений и сопровождения эксплуатационных задач. Традиционные подходы, предполагающие итерационное проектирование на основе дорогостоящих испытаний становятся неконкурентоспособными [27], что создаёт предпосылки к цифровой трансформации производства и переводу процессов проектирования на цифровые модели. Интегратором, обеспечивающим преодоление разрыва между реальным объектом и его виртуальным образом, выступает концепция цифровых двойников, предложенная M. Grieves [270].

Цифровой двойник – это цифровая модель объекта или процесса, которая включает в себя технические модели, описывающие его компоненты, характеристики и поведение, а также эксплуатационные данные. В научных источниках определения цифрового двойника различаются, но в их основе лежит интеграция исторических и актуальных данных о физическом объекте или процессе, а также

методов их получения, преобразования и применения для повышения эффективности производства. В [27] приведена классификация цифровых двойников, выполненная по признакам: момент появления цифрового двойника относительно реального объекта или процесса; уровень адекватности цифрового двойника реальному объекту или процессу; цель применения цифрового двойника.

Цифровые двойники в промышленности могут применяться как на стадии НИОКР, где моделирование помогает значительно снизить время и затраты на разработку, включая испытания, так и управлять изменениями на всех последующих стадиях. Передовой опыт применения цифровых двойников отмечается в различных критических областях, так в системах энергетики в основе цифровых двойников лежат онтологические модели, которые обеспечивают моделирование структуры объектов и производственных процессов и имитацию их деятельности [122]. Предложенная в [123] концепция управления знаниями на основе онтологического инжиниринга обеспечивает семантическую интеграцию данных, знаний и программных компонентов в рамках единой информационно-коммуникационной среды – облачного сервиса, предоставляющего доступ к вычислительным ресурсам математического и семантического моделирования. Цифровой двойник отличается от традиционных систем автоматизированного проектирования (САПР) тем, что он представляет собой развивающийся цифровой профиль исторического и текущего поведения физического объекта или процесса, направленный на поддержку жизненного цикла изделия [317]. Выделяют следующие типы цифровых двойников: цифровой прототип – содержит подробную высокоточную модель, но при этом не включает в себя результатов измерений или отчётов; цифровой экземпляр – содержит информацию о настройках модели, управляющих параметрах, данные с датчиков и исторические сведения для изделия, устройства или процесса.

Концепция цифровых двойников развивается для различных сфер производства сложной высокотехнологичной продукции, как в глобальных проектах крупных корпораций, так и в отдельных научных исследованиях. Компании аэрокосмической отрасли ведут исследования по созданию цифровых двойников своих

изделий, что позволит иметь все параметры для моделирования и анализа отклонений работы оборудования [241]. Переориентация процесса проектирования на цифровые модели позволяет значительно минимизировать общий объем затрат, сократить издержки и обеспечить создание наукоемких высокотехнологичных изделий нового поколения в кратчайшие сроки [242]. В [269] предложена концепция цифровых двойников аэрокосмических аппаратов как интегрированной мультифизической модели. Её создание обеспечивает переход от инженерной практики, основанной на эмпирических данных, к междисциплинарным методам. Модель включает расчётные методики, данные датчиков, исторические данные, историю обслуживания и пользовательские отчёты. Объединив всю эту информацию, цифровой двойник позволяет обнаруживать проблемы до того, как они станут критическими, путём сравнения прогнозируемых и наблюдаемых факторов.

Независимо от масштаба цифрового двойника, представляющего отдельные компоненты, объекты, системы или совокупности объектов для их создания требуется интеграция 3-х элементов [237]:

- базовой модели для описания устройства и принципов функционирования объекта;
- базы знаний, содержащей дополнительные источники информации, экспертные оценки, методические рекомендации, данные за прошлые периоды;
- аналитики, дополняющей базовую модель статистическими данными, моделями, полученными с использованием искусственного интеллекта или машинного обучения для оценки и прогнозирования технологического состояния реального объекта.

Включение в состав информационных ресурсов, технологий, производственных и иных процессов может значительным образом различаться, однако основу их составляют перечисленные элементы. Цифровой двойник должен не только адекватно описывать поведение реального объекта, но и моделировать различные возможные и непредвиденные ситуации [28].

Построение цифровых двойников выполняется на основе различных технологий моделирования и подходов к сбору и накоплению информации о поведении сложных технических систем. Для выбора подходов, обеспечивающих построение базовых элементов цифровых двойников, включающих модели, базы знаний и данные наблюдений, выполнен обзор существующих методов построения моделей технических систем, сбора аналитики по испытаниям реальных устройств и создания баз знаний, отражающих отраслевые особенности производства бортовых систем космических аппаратов.

1.2.2. Технологии компьютерного моделирования в жизненном цикле бортовых систем космических аппаратов

Компьютерное моделирование является основным методом исследований во всех областях знаний и научно обоснованным методом оценок характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах инженерной деятельности [5, 205]. Проблемам создания и внедрения методов моделирования на основе системного подхода для поддержки решения задач в аэрокосмической отрасли уделяется большое внимание в современных научных исследованиях российских и зарубежных учёных: Микрина Е.А., Кульбы В.В. [127, 128, 129], Куренкова В.И. [108, 109], Блинова В.Н., Мостовой Я.А. [133], Зеленцова В.А., Соколова Б.В. [73], Лахина О.И., Полникова А.С. [111], Елубаева С.А., Джамалова Н.К. [65], Eickhoff J. [243, 263], Zanon O. [358], Sándor B., Szalai S. [334, 346], Cazenave C. [253], Eggleston J., Boyer H. [262], Sarkarati M., Merri M. [327], Cheol-Hea Koo, Hoon-Hee Lee [255], Strzepek A., Esteve F. [342] и другие.

Моделирование в целом представляет собой сложный многоэтапный процесс, направленный на выявление свойств и закономерностей, присущих исследуемым объектам. Для анализа функционирования сложных систем применяются имитационное моделирование [180]. *Имитационное моделирование* – это процесс создания и проведения экспериментов с компьютерными моделями физической системы [256]. В процессе моделирования решается множество взаимосвязанных задач, среди которых основными являются разработка модели, анализ свойств и

выработка рекомендаций по модернизации существующей или проектированию новой системы [134]. Под моделью понимается отображение системы-оригинала, имеющее определённое объективное соответствие ей и позволяющее прогнозировать и исследовать её функциональные характеристики, определяющие взаимодействие системы с внешней средой. Компьютерная модель выполняется с помощью взаимосвязанных компьютерных таблиц, блок-схем, диаграмм, графиков, рисунков, анимационных фрагментов, гипертекстов и т.д., отображающих структуру и взаимосвязи между элементами объекта [113]. Существующие и проектируемые системы можно исследовать с помощью имитационных моделей, выступающих в качестве инструмента экспериментатора с моделью взамен исследования реального объекта [205].

Большую часть исследований можно отнести к двум направлениям [233]. Первое – разработка системы (задача синтеза). В этом случае конечный вид объекта ещё неизвестен, требуется построить его приближенное представление и найти параметры, при которых процессы в системе будут удовлетворять целям проекта. Второе – исследование реальной системы (задача анализа). Оно требует изучения объекта и выделения ключевых факторов, оказывающих влияние на систему. Выделяют прямые задачи анализа, при решении которых исследуемая система задаётся параметрами своих элементов и требуется определить реакцию системы на действующие силы, и обратные задачи анализа, которые по известной реакции системы требуют найти возмущения, заставившие рассматриваемую систему прийти к данному состоянию и данной реакции [183].

Система описывается разными моделями, обладающими свойствами для решения определённого круга задач, относящихся к её структуре и функционированию [187]. Моделирование базируется на математической теории подобия, согласно которой абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим, точно таким же. При моделировании большинства систем абсолютное подобие невозможно, и основная цель моделирования – модель достаточно хорошо должна отображать моделируемую систему в соответствии с поставленной целью моделирования [71]. Целенаправленная модель представляет собой

замену действительности с той степенью абстракции, которая полезнее для поставленной цели и включает границы системы в целом и её подсистем, описания внешней среды, переменных, параметров, зависимостей, ограничений, целевые функции и критериев контроля их достижения [117].

Выбор метода моделирования и необходимая детализация моделей существенно зависят от этапа жизненного цикла сложной технической системы. На этапах разработки технического задания модели носят описательный характер и преследуют цель наиболее полно представить в компактной форме информацию об объекте. На этапах разработки технического и рабочего проектов систем модели отдельных подсистем детализируются и моделирование служит для решения конкретных задач проектирования, т. е. выбора оптимального по определённому критерию при заданных ограничениях варианта из множества допустимых [205]. Моделирование и симуляция позволяют конструкторам проверять соответствие проектных спецификаций, проводя эксперименты на виртуальных прототипах, что значительно сокращает цикл проектирования и снижает его стоимость. Кроме того, моделирование предоставляет немедленную обратную связь о проектных решениях, что, обеспечивает всестороннее изучение альтернатив и повышает качество проектов [333]. Целевое назначение моделирования на этапе внедрения и эксплуатации сложных систем – это проигрывание и анализ ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации объекта [205].

В [73] представлена концепция комплексной автоматизации космического производства, основанная на иерархической структуре, включающей АСУ космодрома (ведёт учёт и управление ресурсами), АСУ производственных процессов (инициирует, отслеживает, оптимизирует, документирует процессы подготовки и пуска ракет космического назначения), АСУ технологических процессов (выполняет автоматизацию сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации). Выполнена интеграция баз данных, знаний и математических моделей предметной области. Предложена модель представления слабо формализуемых знаний в виде неупорядоченной совокупности отношений, определяющих ограничения на параметры задачи для мониторинга состояний космических средств.

При системном подходе проблема исследования рассматривается в целом, поведение объекта изучается независимо от его внутреннего устройства. Исследуемый объект в таком случае рассматривается как интегрированный набор элементов, направленных на достижение определённых целей [336]. Логическая структура моделируемой системы должна адекватно отображаться в модели, и процессы её функционирования, динамика взаимодействия её элементов должны воспроизводиться на модели.

Моделирование предназначено для выбора структуры и параметров проверки проектных решений в штатных и нештатных ситуациях и прогнозирования поведения объектов. Построение имитационной модели включает структурный анализ моделируемой системы и разработку функциональной модели [205].

Структура должна отражать наиболее существенные взаимоотношения между элементами, обеспечивающими существование объекта в целом и его основные свойства [125]. Для моделирования структуры системы используются подходы на основе графов или блок-схем [333], которые позволяют строить модели из отдельных элементов и задавать подключения интерфейсов между ними, независимо от их будущих реализаций [360]. При описании моделируемого объекта бывает недостаточно перечислить элементы, из которых он состоит [51], требуется выполнить расчленение модели на подсистемы из которых она состоит. В этом случае могут применяться методологии, поддерживающие иерархии моделей. Например, в [358] модель строится с помощью диаграммы классов UML. В [23] для построения моделей применяются графические инструменты на основе технологии функционального моделирования IDEF0. Инструменты моделирования должны сопровождаться методами визуального формирования модели из графических элементов, что за счёт простоты и наглядности обеспечит существенные преимущества проектирования, анализа и отладки построенных решений [340].

Для задания методов функционирования исследуемых объектов применяются готовые инструменты и пакеты моделирования, либо создаются собственные программные системы [69, 126]. Среди популярных инструментов – универсальные языки программирования, языки имитационного моделирования [260, 341],

имитационные системы, которые используются для моделирования объектов широкого спектра назначения, предметно-ориентированные системы. Некоторые из них ориентированы на простоту использования, что ставит под угрозу их гибкость, в то время как другие фокусируются на гибкости и, как следствие, более сложны в использовании [299].

Языки имитационного моделирования различаются своей направленностью, организацией процесса моделирования, принципами управления модельным временем и другими характеристиками. Их конструкции по сравнению с универсальными языками программирования позволяют более удобно строить и модифицировать модели [95]. Несмотря на это, они подвергаются критике за высокий уровень сложности самого языка в сочетании с довольно ограниченными возможностями моделирования.

Имитационные среды не требуют дополнительного программирования, которое заменяется составлением моделей из библиотечных графических модулей. Принято выделять три класса моделируемых объектов: дискретные, непрерывные и комбинированные [115]. В этой связи развиваются три класса подходов к моделированию [29]. Для дискретного моделирования используются системы, основанные на описании процессов (process description), в их числе Extend, Arena [248], ProModel, Witness, Taylor, Gpss/H-Proof и др. [118]; системы, основанные на сетевых концептах (network paradigms), таких, как сети Петри и их расширения; системы моделирования сети кусочно-линейных агрегатов и др. Для непрерывного и комбинированного моделирования используют модели и методы системной динамики, реализуемые такими программными продуктами, как Powersim, Stella, Ithink и др.; динамические системы (MatLab); системы агентного моделирования (например, AnyLogic). Большая часть программных пакетов сочетает в себе различные методы моделирования. Наиболее популярными системами общего назначения являются [57]: AnyLogic [93, 246], ExtendSIM [289], GPSS World [2, 25], MicroSaint, Simplex3 и Simulink [329]. Они предоставляют предметно-ориентированные инструменты, предназначенные для решения промышленных и научно-исследовательских задач. Для этого в них включаются абстрактные эле-

менты, языковые конструкции и наборы понятий, взятые непосредственно из предметной области исследований.

К динамическим системам относится MatLab Simulink [29, 56] предназначенная для выполнения инженерных и научных расчётов и высококачественной визуализации получаемых результатов. Эта система применяется в математике, вычислительном эксперименте, имитационном моделировании. В пакет входят численные методы, операторы графического представления результатов, средства создания диалогов. Simulink предоставляет технологию визуального моделирования. Интеграция между MatLab и Simulink обеспечивает быстрое построение и тестирование виртуальных прототипов.

Система ExtendSIM [258] позволяет моделировать непрерывные, дискретно-событийные, основанные на агентах, линейные, нелинейные и смешанного типа процессы. Она имеет достаточно мощный графический интерфейс, позволяющий конструировать схемы процессов в виде блок-схем и проводить эксперименты, поддерживает 2D и 3D анимацию. На этапе создания модели требуется частичное написание кода при задании свойств объектов на специализированном языке ModL. Этот язык позволяет разрабатывать дополнительные блоки модели с новой функциональностью, расширяя тем самым стандартные возможности системы.

Система GPSS World [25] предназначена для моделирования как дискретных, так и непрерывных процессов. Она обладает широкими возможностями построения моделей на основе высокоуровневого языка имитационного моделирования. Однако отсутствие средств графического построения модели и ограниченные возможности визуализации результатов моделирования затрудняют её использование.

В [92] представлен отечественный программный комплекс «МВТУ», созданный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, который предназначен для исследования динамики и проектирования самых разнообразных систем и устройств. По своим возможностям он является альтернативой аналогичным зарубежным программным продуктам Simulink, VisSim и др. и позволяет рассчитывать, моделировать и исследовать любые механические, гидравлические, теплотехнические, электротех-

нические, биотехнические устройства, средства автоматики. Комплекс является открытым программным продуктом, методическое обеспечение выполнено на русском языке. Успешно применяется для проектирования систем автоматического управления, следящих приводов и роботов-манипуляторов, ядерных и тепловых энергетических установок и др.

В настоящее время большую популярность набирает агентное моделирование, суть которого заключается в представлении модели в виде набора агентов и среды функционирования и исследовании их поведения и взаимодействия [6]. Такой подход носит недетерминированный характер и позволяет определять функции модели как результат деятельности составляющих её агентов [5, 6]. Для агентного моделирования широко используется AnyLogic [210]. В основе лежат языки и методы, принятые в практике разработки сложных информационных систем. Поддерживаются следующие парадигмы моделирования: методы системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования, а также гибридный подход к построению моделей [57]. Объектно-ориентированное расширение AnyLogic™ предоставляет возможность быстрого создания профессиональных агентных моделей в собственной графической среде, поддерживает языковые конструкции для задания поведения агентов, их взаимодействия, моделирования среды, а также предоставляет богатые анимационные возможности [29, 94]. Агентное моделирование не имеет сложившегося набора стандартных функций и процедур для разработки моделей. Для графического построения моделей может быть использован язык UML, который обеспечивает высокий уровень абстракции и независимость от методов реализации модели [117]. Однако построение графической модели, имеющей сложную архитектуру, требует создания специализированных инструментов.

В целом можно отметить, что системы имитационного моделирования общего назначения используются при анализе любой предметной области, что делает их универсальными, но в то же время более сложными в освоении и применении, повышая требования к квалификации специалистов [57]. Многие системы моделирования обеспечены средствами для интеграции с другими программными сре-

дами. Это блоки анализа входных данных или чувствительности модели, позволяющие осуществлять имитационные эксперименты с различными данными [117]. Однако широта возможностей систем определяет сложность их адаптации к конкретной предметной области. Для преодоления этого недостатка разрабатывают узкоспециализированные системы, направленные на решение конкретного класса задач в определённых предметных областях. В литературе встречаются подходы, позволяющие на основе графических инструментов конфигурировать модели из отдельных моделей технологического оборудования [195], что позволяет существенно упростить процесс построения готовых решений, но требует широкой базы элементарных моделей. Предметная ориентация позволяет пользователю не отвлекаться на особенности той или иной системы моделирования, что делает узкоспециализированную систему более доступной для изучения и ускоряет процесс разработки модели.

Рассмотрим примеры узкоспециализированных систем [330]. Система SIMSCRIPT [267] предназначена для моделирования сетевой архитектуры на основе дискретно-событийного подхода. Используется встроенный язык программирования для построения моделей с интерактивным графическим интерфейсом. Система включает в себя интерактивную среду проектирования, подсистему отладки, пакет статистики, пакет для построения диаграмм, 2D и 3D графиков во время работы модели. Система QualNet [259] предназначена для планирования, тестирования и изучения поведения реальных проводных и беспроводных сетей связи. Эта система предоставляет собой комплексную среду для разработки протоколов, создания и анимации сетевых сценариев и анализа их производительности. Преимущества: скорость моделирования в реальном времени, масштабируемость на основе параллельных вычислений, точность за счёт реализации протокольных моделей на основе стандартов, переносимость на различные операционные системы, распределённые, кластерные, параллельные архитектуры и вычислительные платформы, а также расширяемость путём подключения к другим аппаратным и программным приложениям. Инструментальный комплекс SIRIUSII [228] предназначен для моделирования таких сред, в котором особое

внимание уделено учёту специфики предметных областей решаемых задач. В основе моделирования лежит концептуальная модель предметной области. Для построения моделей применяется язык GPSS [219]. Архитектура инструментального комплекса включает: подсистему спецификации модели, конструктор имитационной модели, исполнительную подсистему и подсистему анализа. Подходы применяются специалистами в области параллельных и распределённых вычислений для анализа и оценки надёжности используемых ими вычислительных систем. Узкоспециализированная система TRIAD [126] предназначена для проектирования и моделирования вычислительных систем. Для создания имитационной модели, сбора и обработки информации о модели во время имитационного эксперимента разработаны языковые и программные средства. В основе системы лежат мультиагентные технологии и онтологический подход, которые позволяют обеспечивать гибкую настройку на предметную область.

В работе [250] представлена технология проектирования спутников на основе обобщённого дерева космического аппарата. Дерево позволяет учитывать цели эксплуатации и выделять отдельные элементы, интегрированные в конструкцию спутника. Декомпозиция элементов дерева позволяет проводить идентификацию отдельных типов оборудования, обеспечивающих выполнение полётного задания, и описывать его методы работы при номинальных и нештатных режимах эксплуатации космического аппарата. Такой подход позволяет подбирать конфигурацию спутников с учётом целей, задач и ограничений на технические характеристики оборудования.

В настоящее время широкое применение получили технические информационные системы, представляющие собой компьютерные виртуальные конструкторы: Electronics Workbench, Vissim, LabVIEW, MatLab\Simulink и другие системы, решающие задачи схемотехнического моделирования. Эти системы позволяют виртуально строить любые инженерные имитаторы электронных систем и логических устройств с использованием компьютерных аналогов электротехнических деталей и измерительных приборов [7].

Например, система VisSim [271] предназначена для моделирования динамических систем, имеет интуитивный интерфейс для создания блочных диаграмм и мощное моделирующее ядро. Программа предоставляет графический интерфейс, с помощью которого исследователь создаёт модели из виртуальных элементов так же, как если бы он строил реальную систему из настоящих элементов. Это позволяет создавать, а затем исследовать и оптимизировать модели систем широкого диапазона сложности. VisSim используется в разработке систем управления и цифровой обработки сигналов. Основными областями моделирования являются аэрокосмическая, биологическая, медицинская, электротехническая, экономическая и другие.

Система технического моделирования LabView [251, 292] (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) представляет собой среду графического программирования, предназначенную для создания прикладного программного обеспечения информационно-измерительных систем, а также различных компьютерных систем сбора и обработки экспериментальных данных [17]. Она представляет собой платформу для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G». Программа LabView состоит из двух частей: блочной диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора и лицевой панели, описывающей его внешний интерфейс. Виртуальные приборы могут использоваться в качестве составных частей для построения других виртуальных приборов. Лицевая панель виртуального прибора содержит средства ввода-вывода и используется для управления виртуальным прибором, а также для обмена данными. LabView поддерживает огромный спектр оборудования различных производителей и имеет в своём составе многочисленные библиотеки инструментов для получения данных с внешних устройств.

Невозможно однозначно ответить, какой из подходов к построению систем имитационного моделирования лучше, их применение определяется спецификой решаемой задачи. Несмотря на то, что моделирование является простой и наглядной формой анализа сложных систем и вносит значительный вклад в развитие многих технических областей, в космической отрасли оно не получило широкого

внедрения [272]. Это связано с повышенными требованиями к любым применяемым технологиям, сложностью использования существующих программных решений, необходимостью высокой квалификации и большого опыта работы персонала. Кроме того, в связи со спецификой предметной области в открытых источниках содержится недостаточный объем информации, позволяющий судить о широте применения имитационных моделей в космическом приборостроении.

Рассмотрим некоторые примеры применения технологий имитационного моделирования для решения задач космической отрасли. В [358] представлена среда моделирования нового поколения SimTG которая в настоящее время используется во всех космических программах Astrium Satellites. Реализация имитационных моделей выполняется на основе C++ с использованием генерации кода. В [322] обсуждается среда, разрабатываемая для различных задач международной космической станции. Модели охватывают все фазы миссии, включающие наземные, инженерные и полётные операции. Модели построены с использованием разных имитационных парадигм, таких как непрерывное моделирование, системная динамика, дискретное моделирование и моделирование на основе агентов. Результаты имитационного моделирования используются в качестве входных данных для экспертной системы, предназначенной для поддержки принятия решений. В [9] с помощью пакета моделирования Matlab разработана имитационная модель космической командно-ретрансляционной системы для оценивания пространственной доступности радиоизлучений. Модель позволяет определять временные интервалы, в течение которых возможен приём сигналов командно-ретрансляционной системы в заданной точке размещения наземной станции радиомониторинга и используется при решении задач планирования мониторинга прямой радиолинии. В [246] симуляторы, в сочетании с моделями системной инженерии, обеспечивают минимизацию рисков при проектировании и строительстве спутников. Имитационное моделирование является важным инструментом решения задач тестирования, проверки функциональности и отработки основных режимов управления космическим аппаратом [65].

В работах [334, 346] описывается применение имитационных моделей для создания и функциональной проверки отказоустойчивости и надёжности модулей космического аппарата. Разработан специальный язык моделирования – DSML, с помощью которого можно описать поведение бортового оборудования. Предложена концептуальная архитектура обобщённой схемы моделирования, которая обеспечивает возможность имитации бортовых систем и симуляции миссии в целом. Поддерживается параллельное и распределённое моделирование подсистем. Концептуальная архитектура позволяет динамически заменять моделируемое оборудование реальным аппаратным элементом для его тестирования.

В [231] для анализа оперативности функционирования бортового комплекса управления космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли применяются модели на основе разомкнутых сетей массового обслуживания. Модель учитывают затраты на сжатие графических изображений и их передачу при расчёте распределения времени пребывания заявки в бортовом комплексе управления.

В [64] представлен подход, позволяющий моделировать процессы функционирования космических аппаратов с учётом вероятности появления накапливающихся отказов элементов бортовых систем. В качестве средства описания и исследования математических моделей использован формальный аппарат теории макро-Е-сетей (являющихся модификацией сетей Петри). Космический аппарат рассматривается в виде динамической системы с дискретными событиями. С помощью предложенного подхода был решён ряд практических задач моделирования аппаратов зондирования Земли. Недостаток использования сетей Петри и их модификаций заключается в сложности ввода большого количества информации, описывающей структуру и динамику сети. Расширением подхода, позволяющим избежать указанных недостатков, является создание естественно-языковых средств взаимодействия с пользователем. Пример реализации такого подхода показан в [230].

Большое число научных исследований посвящено проблеме использования методов моделирования для синтеза технических решений [108, 109, 211, 234, 243]. Применяются сложные многоцелевые модели, эвристические методы,

алгоритмы быстрого прототипирования, аналитические модели и методы оптимизации, позволяющие формировать структуру космических систем с учётом показателей целевой эффективности, бюджетных ограничений и факторов риска [354].

В [108] представлено программное обеспечение, выполняющее расчёт и оптимизацию проектных параметров изделий, как отдельных подсистем, так и ракет-носителей. Разработаны модели основных систем космических аппаратов, позволяющие учитывать физические принципы функционирования систем с различной степенью детальности. На основе моделей выполняется выбор основных проектных параметров, массогабаритных характеристик и осуществляется компоновка летательного аппарата. Для автоматизации этого процесса выполнена интеграция программного обеспечения в CAD-систему. Это позволяет, после определения характеристик систем и составных частей изделия ракетно-космической техники, осуществлять его проектирование из типовых элементов, созданных в библиотеке CAD-системы.

В [211] представлены методические основы разработки проблемно-ориентированной системы автоматизированного проектирования, позволяющей в интерактивном режиме формировать проектный облик космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Процесс постановки и решения задачи включает следующие этапы: задание характеристик объекта проектирования и зависимостей между ними, указание подмножества входных и выходных параметров, формирование математической модели, её декомпозиция, проверка корректности и разрешимости задачи, поиск последовательности решения. Метод позволяет выполнять поиск решений для задач большой размерности.

На основе многоуровневой модели космического аппарата решаются задачи обоснования требований к техническому оснащению аппаратов при их создании и модернизации [234]. Предложен метод, позволяющий выполнять формирование модели, выбор степени детализации элементов, определение показателей каждого уровня, обоснование их межуровневого взаимодействия, а также реализована итерационная процедура обоснования требований. Данная процедура определения требований к отдельным устройствам основана на принципе сбалансированности

(равновесия, непротиворечивости) значений показателей (характеристик) всех уровней формируемой модели космического аппарата [234].

Развиваются методы синтеза основных проектных характеристик изделий ракетно-космической техники, построенные на базе эвристических алгоритмов [109]. Эвристики позволяют решать проблемы согласования массогабаритных, энергетических, ресурсных, временных и других характеристик целевой аппаратуры или полезной нагрузки бортовых обеспечивающих систем и изделия в целом. Алгоритм работы таких систем заключается в следующем: выбирается задача проектирования, номенклатура бортовых систем, вводятся соответствующие функциональные связи характеристик составных частей (элементов, узлов, агрегатов), определяется корректность поставленной задачи с учётом введённых операторов связи и возможность её решения, и в автоматическом режиме формируется последовательность решения поставленной задачи.

Задачи синтеза решаются не только для отдельных целевых устройств, а и для разработки универсальных платформ малых космических аппаратов [203]. Проектирование универсальных платформ сводится к процедуре структурно-параметрического синтеза на основе системы физических, математических и комбинированных моделей. Решение проектных задач обеспечивается за счёт использования модульного принципа, приводящего в конечном итоге к уменьшению размерности вектора проектных параметров, а также за счёт декомпозиции задачи синтеза, т.е. решения совокупности частных проектных задач, объединённых ресурсными и информационными связями.

Большая группа исследований посвящена комплексным подходам и методам системного анализа, предназначенным для поддержки разработки бортовых систем и бортового программного обеспечения [127, 128, 129]. Концепция построения бортовых комплексов управления требует системного подхода к проектированию бортовых средств управления и контроля космических аппаратов различного класса и назначения. Центральное место в технологии создания бортового программного обеспечения занимают вопросы отработки и испытаний с использованием стендов имитационного моделирования [127]. Управление системами

космического аппарата осуществляется путём формирования соответствующих команд и сигналов. В [128] предложена формальная методология проектирования модульного программного и информационного обеспечения бортового комплекса управления космическими аппаратами. Методология включает инструменты синтеза оптимального состава модулей бортовых программ на этапе технического проектирования системы и концепцию испытаний программного обеспечения, основанную на сценарном подходе и методах функциональной интеграции. Предложена совокупность матричных моделей, обеспечивающая формализованный анализ и структуризацию процессов появления и развития нештатных ситуаций. Подход позволяет выполнять планирование и оптимизацию программного обеспечения по временным и стоимостным критериям. Развитием методологии синтеза состава программного обеспечения является методология реализации процесса его тестирования и отладки. Предложен метод выбора множества тестируемых магистральных путей, которые обеспечивают необходимые показатели функциональной корректности программного обеспечения, режимов работы систем и приборов космического аппарата, включающих расчётные и нештатные ситуации.

При создании моделей больших систем, их части могут разрабатываться различными коллективами, использующими средства моделирования при анализе и синтезе отдельных подсистем. Проблема оперативного обмена имитационными моделями или результатами моделирования отдельных взаимодействующих подсистем требует обязательного внимания при разработке средств моделирования [205]. В мировой практике научных исследований большое значение имеют технологии интеграции и повторного использования имитационных моделей (Simulation-oriented model reuse, SOMR) [296]. Они позволяют обеспечивать переносимость моделей различных производителей, повторно использовать существующие модели, решать вопросы их взаимодействия в крупных комплексных проектах. Интерес к технологии SOMR неуклонно растёт в связи с развитием систем моделирования, ростом количества имитационных моделей и расширением требований к имитационным системам. Исследователи хотят в полной мере использовать существующие системы имитации и ресурсы имитационной модели, и

при этом иметь возможность строить модели для удовлетворения потребностей различных приложений. Это возможно, если используемые ими системы моделирования поддерживают технологию повторного использования моделей. Чем сложнее моделируемая система, тем сложнее её модель. Гетерогенность объектов моделирования отражается в гетерогенности методов и используемых инструментов. В этом случае возникает несовместимость моделей, вызванная тем, что инструменты моделирования разрабатываются в разных инженерных сообществах, используя разные техники и подходы. Если модели правильно использовать, это значительно сокращает затраты на разработку систем, уменьшает сроки реализации и повышает качество готовых решений.

Реализация технологий повторного использования продвигается в двух актуальных направлениях: разработка самих моделей на основе существующих технологий и создание прикладных систем моделирования или сред, включающих инструменты интеграции моделей. В [344] предложена концепция гетерогенного моделирования Птолемей II, позволяющая учитывать различия в синтаксисе, семантике и прагматике между предметными областями и максимизировать совместимость конструкций, выраженных в разных областях. Существуют некоторые классические методы и технологии, которые можно отнести к SOMR. В работах [115, 296] проведён широкий обзор методов, позволяющих реализовывать повторное использование имитационных моделей. Например, технология Meta Model, Model Engineering, базовая объектная модель (BOM), стандарты (SMP / SMP2, HLA, DIS [339] и др.), специализированные языки моделирования (Modelica и др.), общие языки моделирования (UML, SMDL, XML, SRML и др.) [221, 315], технологии моделирования на основе онтологии, среды моделирования, ориентированные на повторное использование (COTS, Simulink и др.), технологии Semantic Web Service и многие другие.

Технология Meta Model представляет собой способ абстрактного моделирования. Она содержит инструменты создания интерактивной структурной модели на основе архитектуры компонентов для взаимодействия с пользовательскими интерфейсами. Технология Model Engineering предназначена для решения проблем

типовой неоднородности [273]. Она решает вопросы поддержки полного жизненного цикла моделей с минимальными затратами и позволяет динамически изменять модели, постоянно совершенствуя и внося новые элементы. Технология реализует язык описания и построения моделей. В её состав входят инженерные модели и среда, выполняющая моделирование [359]. Универсальные языки разметки также могут обеспечивать технологии повторного использования. Например, XML позволяет создавать открытые, стандартизированные форматы данных, служит для межплатформенного анализа, поддержки вычислений и обмена результатами [134]. Кроме того, он используется в качестве основы для файлов, в которых хранится имитационная модель. Это даёт преимущества стандартизированного доступа к данным, облегчает добавление новых возможностей и плагинов, создаёт условия для интеграции. Основанный на XML язык SRML предоставляет средства для описания поведения данных. SRML на равных работает как с программной логикой, так и с данными.

Кроме того, для реализации технологии повторного использования имитационных моделей существует целый ряд стандартов, определяющих правила построения систем имитационного моделирования. Стандарт High Level Architecture (HLA) [115] определяет архитектуру распределённых систем имитационного моделирования. Примеры использования стандарта HLA показаны в [279, 254]. Открытый стандарт Common Image Generator Interface (CIGI) [338] предназначен для трансляции информации от сервера с программой имитации к устройству отображения информации и последующей визуализации. Он применяется в компании Boeing для создания тренажёров летательных аппаратов.

В космической отрасли базовым технологическим стандартом, определяющим правила построения систем имитационного моделирования, является стандарт Европейского космического агентства – Simulation Model Portability (текущая редакция SMP2) [331]. Программные среды, реализующие стандарт SMP2, называются Инфраструктуры имитационного моделирования (Simulation Infrastructures) [247]. Стандарт SMP2 обеспечивает нормативную основу, определяющую информационные элементы и программные инструменты, которые необ-

ходимо сформировать для построения инфраструктуры имитационного моделирования [264]. В основе стандарта лежит метамодель, написанная на формальном языке Simulation Model Definition Language (SMDL) [332]. Стандарт SMP2 нашёл широкое применение в задачах моделирования космических систем. На нем построены такие инфраструктуры как SimSAT Европейского космического агентства [262, 327], SimTG – Astrium Satellites [253], симулятор европейского центра управления полетами – SWARMSIM [265, 319], программное обеспечение южнокорейского института аэрокосмических разработок [255] и др.

Среди работ, основанных на стандарте SMP2, стоит отметить крупный научно-исследовательский проект MERLIN [342], который направлен на разработку спутников дистанционного зондирования для мониторинга парникового газа. Это франко-германский проект партнёрства, «состоящего из обороны и космоса»: Airbus, CNES и Thales Alenia Space. Применение SMP2 позволило выполнить стандартизацию всех компонентов пространственной системы, сделать их более надежными, снизить затраты и оптимизировать график разработки. Уникальность проекта MERLIN заключается в интеграции имитационных моделей, разрабатываемых исследователями на четырёх различных SMP2 платформах имитационного моделирования.

В [247] представлен опыт применения инфраструктуры имитационного моделирования EUROSIM для космической программы Galileo, выполняющей развитие европейской спутниковой навигационной сети. Реализация проекта позволила минимизировать взаимодействие моделей с их средой моделирования, стандартизировать интерфейсы между моделями и средой, сделать модели понятными для других имитационных систем. В настоящее время доступны плагины SIMSAT SMP [262], EUROSIM SMP и SMP-совместимая среда моделирования SLIMSAT, предназначенная для обучения, разработке моделей и тестирования.

Несмотря на общий подход, вопросы построения моделей в каждом из приведённых примеров решаются оригинальными методами. Стандарт SMP2 определяет использование программных моделей, написанных на языке C++. Для специалистов предметной области создание таких моделей затруднительно. Для пре-

одоления этого недостатка программные системы создают собственные компиляторы моделей для генерации кода C++ и решают проблемы синхронизации моделей для обеспечения согласованности [276]. В других случаях имитационные модели строятся в системах моделирования, не поддерживающих стандарт, а затем используются инструменты интеграции с SMP системами [161]. Например, программный комплекс MOSAIC, выполняет автоматическую передачу моделей MATLAB/Simulink в SMP2-стандарт [293, 294]. Имитационная платформа K2 [257] поддерживает возможность импортировать любые модели, разработанные в любой совместимой с SMP2 среде. K2 состоит из набора библиотек C++, Python и Java. Платформа используется для моделирования и имитации спутников и их созвездий, выполняя симуляцию в реальном времени, позволяя контролировать и управлять моделированием с помощью настраиваемых графических пользовательских интерфейсов. Графическое представление моделей в инфраструктурах моделирования основано на языке UML [265] или специализированных инструментах. Например, Modelica [298, 328] позволяет создавать структурные элементы модели и в дальнейшем определять поведение модели, используя графический инструмент моделирования Dymola.

Ориентация на стандарты вызывает много проблем подготовки моделей, их синхронизации, обеспечения надёжности и управляемости моделированием. Стандарты следует учитывать при организации систем моделирования, но интеграцию моделей лучше выполнять на основе выделенных компонентов унификации проблемно-ориентированной среды моделирования [305, 309]. Такой подход обеспечивает построение комплексных моделей, включающих базы знаний и библиотеки виртуальные приборов и их применение при проектировании бортовой аппаратуры и в процессе проведения испытаний сложных технических систем.

1.2.3. Методы искусственного интеллекта для моделирования сложных технических систем

Имитационные системы, использующие методы искусственного интеллекта при решении технологических и функциональных задач, называют интеллектуальными системами имитации [114]. Научным исследованиям, освещающим внедрение методов искусственного интеллекта в различные аспекты поддержки производства посвящены работы Точилова Л.С. [220], Чертока Б.Е., Бранца В.Н., Микрина Е.А. [239], Миронова А.Н. [130], Eickhoff J. [263], Stanley G.M. [340], Eito-Brun R. [264], Hennig C. [274] и другие.

Особенности баз знаний для разработчиков ракетно-космической техники заключаются в ориентации на потребности специалистов предметной отрасли, что требует фокусировки на неявные знания и их преобразование в явные, включая процессы их структуризации, формализации и управления [220]. Знания представляют собой итог теоретической и практической деятельности человека, отражающий накопление предыдущего опыта и отличающийся высокой степенью структуризации [206]. Выделяют три составные части знаний: декларативная, представляющая общее описание объекта, системная, содержащая взаимосвязи между понятиями и свойства понятий и процедурная, описывающая алгоритмы решения проблем [60]. Формирование баз знаний способствует накоплению и тиражированию опыта высококвалифицированных специалистов, что обеспечивает механизмы построения информационной памяти предприятия [348]. Популярным методом представления знаний [46, 166] являются правила (condition-action rules) [119, 297, 323]. Строгая форма задания правил и простота их интерпретации сделала такой подход удобным средством описания различных предметных областей [45, 175]. Правила отражают эвристические связи между величинами [225]. Состояние системы определяется как совокупность переменных, необходимых для её описания на определённый момент времени в соответствии с задачами исследования [13]. В процессе имитационного моделирования причинно-следственные связи формируются в виде зависимостей: «Если A , то B », позволяя

делать выводы о возникновении события B , не определяя причин появления события A [324]. Это даёт возможность использовать весь имеющийся объем описательных знаний предметной области [232]. Структура типовой системы, основанной на правилах [116, 59] содержит: базу знаний [268], базу данных, машину вывода, интерфейс с пользователем, модуль приобретения знаний и объяснения решений [5]. Основными особенностями экспертных систем являются [88, 244]: алгоритм решения строится с помощью символических рассуждений, базирующихся на эвристических приёмах; структура представления знаний позволяет объяснять действия системы; наращивание методов функционирования выполняется в редакторе баз знаний без перепрограммирования алгоритмической части системы; обеспечение естественно-языкового интерфейса [209, 191].

Методы искусственного интеллекта применяются в различных прикладных областях. Строятся интеллектуальные агенты, например в [47] правила поведения агентов описываются конструкциями вида «Когда – Если – То» и позволяют задавать множество возможных откликов на текущее состояние среды. Часть правила с пометкой «Когда» описывает события, возникающие в окружении агента, и включает новые сообщения, полученные от других агентов. Часть с пометкой «Если» сравнивает текущее состояние модели с условиями применимости правила. Часть «То» определяет действия в ответ на текущие события и состояния модели и внешнего окружения. Они могут включать обновление модели, коммуникативные и внутренние действия. Агенты представляют собой совокупность взаимосвязанных фрагментов знаний, доступных другим агентам [117]. Их отличает автономность, активность, реактивность и инициативность, поддержка таких качеств в должной мере способствует успешному функционированию интеллектуальных агентных систем [191, 212].

Одним из актуальных направлений исследования сложных технических систем является «онтологический инжиниринг». Теоретическим и прикладным вопросам построения онтологий для интегрированного описания данных и знаний предметной области посвящены работы [70, 268, 121]. В [204] разработан комплекс алгоритмов онтологического анализа данных, позволяющий формально

строить онтологическую модель предметной области на основе эмпирической информации о свойствах и ограничениях объектов исследования. В [70] представлены примеры практического применения систем, основанных на знаниях для оперативного мониторинга технологической инфраструктуры нефтегазодобывающего предприятия. В основе модели знаний лежит онтологический подход, обеспечивающий на основе анализа состояния объектов технологической инфраструктуры формирование рекомендаций по обеспечению заданных показателей функционирования объектов. В [268] онтология позволяет использовать гетерогенную информацию, формируемую корпоративной памятью предприятия для решения производственных задач. В [121] представлены результаты решения задач энергетического комплекса на основе ситуационного управления и онтологий. Представлен подход к построению интеллектуальной системы стратегического ситуационного управления развитием критических инфраструктур. В систему входят базы знаний, представленные графическими онтологиями и объекты, отражающие фактическое состояние исследуемых энергетических объектов в рассматриваемой ситуации. Целью системы является поиск управляющих воздействий, обеспечивающих поддержание или переход к целевой ситуации.

Построение онтологий позволяет применять эвристические данные, основанные на опыте конструкторов бортовой аппаратуры при проектировании систем космического аппарата. В [264] для обмена данными по программному обеспечению в аэрокосмической промышленности разработана онтология, базирующаяся на стандартах Европейского космического агентства. Онтология предоставляет концептуальную основу для разработки передовых информационных систем, в которых информация, поступающая от разных компаний и учреждений, интегрируется в согласованный набор взаимосвязанных данных, интерфейсов и шлюзов между различными инструментами и информационными системами, используемыми участниками аэрокосмических проектов. В [274] представлено применение онтологии для проектирования космических систем, которая обеспечивает повышенную семантическую обоснованность базовых стандартизованных спецификаций данных, позволяет моделям идентифицировать проблемы и применять опера-

тивные знания, собранные по прошлым проектам, к новой проектируемой системе. В общем случае, онтологии представляют собой универсальные средства построения интеллектуальных систем. Для их создания используются семейства инструментальных средств, поддерживающие модельно-ориентированный подход и подход, использующий декомпозицию решаемой проблемы [26]. На основе онтологий разрабатываются надстройки над традиционными PLM-системами. Программный комплекс Smart PLM [111] предоставляет модели, методы и алгоритмы поддержки принятия решений на основе сетецентрического подхода для адекватного реагирования на возникающие события на всех этапах жизненного цикла изделий аэрокосмической промышленности. Частью такой системы является система поддержки эксплуатации изделий – ТОиР Smart Maintenance [112], построенная на основе онтологии и представляющая собой интеллектуальную систему поддержки процессов технического обслуживания и ремонта сложных технических изделий.

В [21, 54] представлены интеллектуальные методы анализа технического состояния и безопасности конструкционных материалов. Создан модельно-управляемый подход, обеспечивающий визуальное моделирование предметной области с последующим автоматизированным формированием баз знаний и синтезированием программных кодов и спецификаций. Для графического моделирования предложено расширение стандарта UML продукциями, описывающими причинно-следственные связи [54]. Применение методов искусственного интеллекта позволяет выполнять анализ уникальных механических систем со сложными структурами причинно-следственных связей, реализующих различные стадии процесса разрушения технологических комплексов. В [21] состояния объектов исследования описываются информационно-логико-математическими моделями, объединяющими данные, знания, онтологии и программные методы. В экспертных системах используется прецедентный подход, объединяющий описание проблемы и её решение. Представленные исследования определяют базовые положения информационной технологии решения междисциплинарных задач техногенной безопасности [22], включая в свой состав методы онтологического моделиро-

вания, группового принятия решений, модельно-ориентированного подхода и искусственной самоорганизации для управления сложными взаимодействующими объектами. В [130] предложены методы прогнозирования качества функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов, рассматривающие нечёткие границы работоспособных состояний БА КА. Выполняется оценка вероятности невыхода параметров технического состояния БА за условные границы поля допуска. Функции принадлежности нечётких границ строятся на основе экспертных знаний. Метод позволяет учесть влияние факторов внешних воздействий и построить векторы показателей качества функционирования БА.

Методам и технологиям построения интеллектуальных систем посвящены работы [47, 66, 226, 239] и др. В [66] представлено программное обеспечение, позволяющее выполнять имитационное моделирование на основе продукционного подхода. Предложен язык имитационного моделирования, позволяющий определять законы управления формализмами продукционных правил и задавать точки принятия решений для осуществления оптимального управления. В [226] представлена конструктивная теория построения бортовых оперативно-советующих систем, позволяющих на основе типовых ситуаций функционирования антропоцентрических объектов вырабатывать рекомендации по рациональному способу разрешения возникающих проблем. Бортовая оперативно-советующая система включает двухуровневую базу знаний, базу математических моделей, блок формирования комментариев к выработанным рекомендациям, блок регистрации отказов экипажа от рекомендаций. Первый иерархический уровень базы знаний строится на продукционных правилах и обеспечивает выбор и активизацию математических моделей значимых событий. Механизмы вывода второго иерархического уровня обеспечивают выбор рационального способа разрешения проблемной ситуации. Другим примером применения методов искусственного интеллекта для бортовых интеллектуальных систем является система, основанная на организации логического вывода по прецедентам [227]. Предложен метод построения матрицы знаний, содержащей ситуационные векторы, каждая координата которых представляет собой лингвистические переменные, заданные нечёткими множе-

ствами. Сопоставление текущей информации с матрицей знаний позволяет формировать рекомендации о разрешении проблемных ситуаций.

В [340] описывается система G2, основанная на знаниях, которая применяется в различных технических областях для моделирования, анализа и контроля состояния технических объектов. Приложения данной системы в космической отрасли обеспечивают повышение скорости и качества решений управления полётами. Система обнаруживает текущие проблемы, прогнозирует потенциальные проблемы и моделирует последствия. В [239] описано программное обеспечение бортовых систем, которое, используя механизмы углублённого анализа и дедуктивного вывода, выполняет генерацию диагноза состояния борта на основе доступной информации и формируют необходимые процедуры управления по выходу из критических ситуаций. База знаний экспертной системы содержит формализованное представление функциональных и причинно-следственных связей между различными аспектами управления (текущим составом активной бортовой аппаратуры, режимами работы бортовых систем, наличием аварийных ситуаций на борту, текущей целевой задачей управления и возможными сценариями её достижения при различных начальных условиях). В [263] построена экспертная система, которая используется на этапах построения концепции, проектирования, проверки и эксплуатации космического корабля. Система позволяет собирать знания о динамическом поведении анализируемого объекта, включающие набор номинальных операций, симптомы ошибок и способы их распространения. Эти знания используются для контроля, диагностики отказов и обучения операторов. Выполненная интеграция процессора знаний и сбора данных расширяет возможности анализа ситуаций. Процессор знаний, на основе собираемых данных, использует симуляторы для определения путей развития ситуаций и предлагает адекватные корректирующие действия.

В [223] показано применение интеллектуальных подходов в ОА «Информационные спутниковые системы» (г. Железногорск). На борту создаваемых ими аппаратов в составе бортового программного обеспечения присутствуют специальные интерпретаторы правил, фактически являющиеся упрощённым аналогом

машины вывода классической экспертной системы. В производстве и эксплуатации космического аппарата применяется модуль «Дежурный контроль и диагностика», предназначенный для обнаружения и парирования возникающих на борту отказов. Правила для интерпретатора дежурного контроля организованы в виде совокупности матриц векторов состояний и связанных с ними последовательностей управляющих действий. Верификация правил осуществляется на наземном комплексе отладки, основу которого составляет программный имитатор космического аппарата, включающий в себя программные модели всего бортового оборудования и штатное бортовое программное обеспечение, работающее в среде программной модели бортового вычислительного комплекса. Развитие технологий интеллектуальной поддержки представлено в программном комплексе СИПР МП [223], предназначенном для проектирования и верификации макропрограмм интегрального управления. В структуру СИПР МП входит редактор базы знаний и программные инструменты конструирования и визуализации макропрограмм дежурного контроля и диагностики, выполняемые на борту с целью выявления сигналов аномальных ситуаций. Автору удалось обосновать актуальность применяемых для поддержки проектирования бортовой аппаратуры подходов на основе интеллектуальных систем логического вывода. Однако для реализации концепции цифровых двойников необходимо не только развитие построенной в данном исследовании модели знаний, но и 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 сценариев испытаний на основе баз знаний, выполнять имитацию систем окружения и проводить анализ функционирования бортовых систем по прецедентам имитационного моделирования.

Применение интеллектуальных имитационных возможностей актуально не только для проектирования и испытания бортовых систем, но и способствует организации исследовательской деятельности. В процессе создания и эксплуатации сложных технических систем возникает необходимость углублённого понимания

структуры, состава и логики работы как самого оборудования, так и используемого программного обеспечения. Создание специализированных средств [224], позволяющих целенаправленно повысить знания о предмете изучения способствует развитию производства космического приборостроения. В [106] представлен пример внедрения интеллектуальных методов в практику создания обучающих систем для формирования содержательной составляющей образовательного процесса и обеспечения качественной диагностики знаний. В [24, 58] рассматриваются методы предоставления учебного материала в соответствии с индивидуальными особенностями обучаемого. Показано формирование траекторий обучения на основе динамической модели управления обучением, поддерживающей совокупность эвристических моделей обучаемого, обучения и объяснения эталонного представления предметных знаний [24]. Недостатком рассмотренных подходов к построению исследовательских систем является ориентация на теоретический материал и недостаточность применения методов получения навыков практических действий. В новой технологии необходимо включить инструменты, обеспечивающие построение и интеграцию теоретических разделов и динамических графических фрагментов знаний. Современные методологии создания систем обучения требуют не ограничивать их в рамках традиционных способов представления материалов, а реализовывать новые возможности подготовки специалистов, обеспечивая условия, максимально приближенных к тем, с реальностью которых им потребуется сталкиваться [18]. Новые технологические подходы к организации исследовательской среды, на основе методов искусственного интеллекта, должны стать универсальным инструментом, сочетающим в себе функции тренажёра и лабораторного места. Это позволит не только обеспечить базовую подготовку специалистов, но и развить умения и навыки принятия решений в нестандартных ситуациях [245].

Существенным вопросом применения интеллектуальных методов имитационного моделирования является оценка качественных характеристик построенных моделей [12]. Методы оценки модели в общем случае сводятся к получению информации о том, насколько хорошо модель описывает реальные процессы, проис-

ходящие в исходном объекте, и насколько качественно она имитирует развитие данных процессов [12]. Критерии оценки включают в себя такие аспекты существования модели, как адекватность, непротиворечивость, полнота и другие [117]. Валидация модели предполагает проверку соответствия между поведением имитационной модели и исследуемого реального объекта с определением границ применимости, на которых сходство успешно достигается [117]. Традиционно, валидация основана на статистическом анализе и оценке ошибок симуляции. Для сложных объектов результаты моделирования могут зависеть от условий имитации, кроме того, на этапах проектирования устройств данные измерений, необходимые для верификации, не доступны, что затрудняет применение традиционных методов. В этом случае применяются альтернативные подходы. Для интеллектуальных систем имитации валидация модели заменена критерием непротиворечивости знаний. Непротиворечивость знаний – логический критерий отсутствия в системе логического противоречия, то есть выводимости утверждения и его отрицания. Валидация данных (непротиворечивость данных) заключается в анализе реакций модели на изменения входных параметров. Рассматриваются как штатные значения, так и состояния модели на границе области определения входных параметров [117]. Верификация модели предполагает проверку на соответствие поведения модели замыслу исследователя. Верификация позволяет доказать возможность использования создаваемой программной модели в качестве машинного аналога концептуальной модели на основе обеспечения максимального сходства с последней. Для верификации модель должна включать все компоненты, указанные на этапе определения системы [256]. Полнота модели – проверка заключается в анализе всех возможных вариантов развития моделируемых процессов, происходящих в реальной системе. В случае больших объёмов данных этот процесс требует (хотя бы частичной) автоматизации. В некоторых случаях критерием полноты пренебрегают сознательно для уменьшения размерности и повышения наглядности имитационной модели. Требование полноты определяет степень детализации модели при её декомпозиции [12].

В [300] предложен метод валидации имитационных моделей, основанный на применении эмпирических данных и знаний, полученных из смежных областей. Знания играют роль эталона при проверке модели и варьируются от измеренных данных реальной системы до качественного опыта экспертов. Предложенный метод имитационного анализа реализован в системе знаний и позволяет автоматически решать задачу валидации. В [33] предложен метод проверки непротиворечивости знаний на основе анализа матрицы инцидентности графа, построенной для обобщённых отношений следования между целевыми установками базы знаний. Исследование графа реализует функции поиска взаимоисключающих правил, которые могут привести к некорректности процедур логического вывода. В [358] верификация моделей обеспечивает контроль согласованности на уровне проверки ссылочной целостности между модулями, поиска циклических зависимостей и др. В [357] предложен интеллектуальный метод проверки модели, основанный на анализе сходства между временными рядами моделирования из компьютеризированной модели и наблюдаемыми временными рядами из реальной системы. Задача формулируется как проблема классификации, включая в себя множество мер сходства с комплексной мерой и позволяет прогнозировать уровень достоверности на основе обучающих выборок. В [205] предложены критерии оценки имитационной модели: точность и достоверность результатов моделирования, время построения и работы с моделью, затраты машинных ресурсов (времени и памяти), стоимость разработки и эксплуатации модели. Наилучшей оценкой является сравнение модельных результатов с испытанием реального объекта при натурных экспериментах. В [266] представлена среда имитационного моделирования, в архитектуру которой заложены методы верификации моделей и генерации тестов. В основе среды лежит абстрактная семантическая модель, к которой приведены программы, написанные в разных источниках. В среде реализована модульность, независимость от языка, мобильность и универсальность. Поддерживается переносимость моделей и их повторное использование.

Проведённый обзор показал актуальность применения методов искусственного интеллекта для моделирования и анализа функционирования сложных тех-

нических систем, а также для поддержки решения исследовательских задач специалистами предметной области. Для интеллектуальных моделей, поведение которых описывается базами знаний, методы их оценки и верификации являются эмпирическими. В новую технологию должны войти методы анализа качества имитационных моделей, основанные на применении экспертных знаний и данных реальных наблюдений поведения объектов исследования. Комплексное применение методов искусственного интеллекта, а также методов мониторинга, анализа и графической визуализации данных обеспечит синергетический эффект новой технологии и будет способствовать её эффективному применению для поддержки жизненного цикла бортовых систем космических аппаратов.

1.2.4. Технологии поддержки испытаний сложных технических систем

Ключевым фактором развития наукоёмкой космической техники является обеспечение функционального и технического контроля бортовой аппаратуры космического аппарата. В этой связи повышается роль измерительных информационных систем [190], предназначенных для автоматического получения количественной информации непосредственно от изучаемого объекта путём процедур измерения и контроля, обработки этой информации и выдачи её в виде совокупности чисел, высказываний, графиков и т.д., отражающих состояние данного объекта [194, 236].

Процессы выполнения всех видов контроля называются испытаниями. Испытания позволяют экспериментально определять количественные или качественные свойства объекта контроля как результата воздействия на него при функционировании². Основная цель испытаний – установить соответствие характеристик объекта испытаний требованиям технической и конструкторской документации [8] и показать, что отдельные компоненты могут работать вместе, как и планировалось для достижения поставленных при проектировании целей [290, 345].

² ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 1982. 24 с.

В условиях ограничения финансирования, увеличения объёма и сложности обрабатываемой информации с одновременным уменьшением времени на принятие решений требуются новые подходы к автоматизации процессов испытаний на базе современных информационных технологий [38]. Созданию технологий и методов поддержки проведения испытаний посвящены работы Везенова В.И., Светникова О.Г. [38], Раннева Г.Г. [190], Цапенко М.П. [236], Александровской Л.Н. [8], Латышенко К.П. [110], Бровкина А.Г., Бурдыгова Б.Г. [30], Батоврина В.К., Бессонова А.С. [17], Барановой Т.П. [3, 4], Баркова А.В. [16], Ключева Е.А. [96], Туркина И., Лучшева П. [222], Паронджанова В.Д. [177], Карасёва А.А. [91], Чуранова С.А. [240], Голышевой О.С., Дунаева А.В. [50], Перцовского М.И. [179], Ртищева А.В. [192], Lau V., Luis de Sousa F., Galski R.L. [295] и других.

Испытания проводятся на всех этапах жизненного цикла объекта – начиная с научно-исследовательской разработки и заканчивая эксплуатацией [110]. Стоимость и длительность испытаний являются определяющими в общих затратах и сроках, необходимых для создания того или иного изделия [96]. От качества проведения испытаний в наземных условиях зависит работоспособность космических систем в условиях космического пространства в течение всего срока их активного существования. Важнейшим условием проведения испытаний является воспроизводимость результатов в пределах допусков, установленных в нормативно-технической документации.

В [13] выполнена систематизация видов испытаний. По своему назначению испытания делятся на исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные. По этапам разработки продукции испытания бывают доводочные, предварительные, приёмочные. Особенностью испытаний бортовых систем является наличие в них внутренних программ работы, собственных протоколов и наборов данных для информационного взаимодействия [30]. В этом случае проводятся автономные и комплексные испытания (АИ и КИ), с имитацией необратимых операций, в штатных и нештатных условиях, в том числе аварийных ситуаций, отказов отдельных резервируемых систем и каналов. Автономным испытаниям подвергаются отдельные подсистемы, составляющие сложную систему.

Комплексные испытания могут проводиться как для группы непосредственно связанных подсистем, так и для всех подсистем в составе объекта испытаний.

Рациональная организация процесса испытаний является приоритетной задачей для повышения качества и снижения затрат производства. Вопросам создания методологии испытаний сложных технических систем, направленной на решение задачи автоматизации посвящены исследования в [53, 136]. Предложена обобщённая математическая модель сложной технической системы как объекта испытаний, которая сопоставляет совокупность свойств объекта испытаний совокупности аппаратных средств, обеспечивающих решение задачи. В [73] предложен подход к проведению автоматизированного контроля технического состояния объекта на основе программы телеизмерений для определения правильности отработки временных программ и выполнения управляющих команд. Исследование включает контроль функционирования, контроль работоспособности, диагностический контроль и прогнозирующий контроль. Подготовка к автоматизированному контролю включает выбор параметров технического состояния и режимов работы систем, выбор допусков и правил сравнения параметров с их номинальными значениями, определение состояния систем и причин нарушения режимов работы, определение последовательности проведения контроля. Задание указанных параметров определяет алгоритмы и программы контроля. Автоматизация испытаний является одним из важных средств повышения надёжности разрабатываемого космического оборудования [17, 41, 80]. Существуют международные и отраслевые стандарты, определяющие общие правила и порядок проведения различных видов испытаний [278, 288, 350, 355]. На основе стандартов и методик строятся универсальные или специализированные программно-аппаратные комплексы [236, 352, 353], разрабатываются программные языки [3, 16, 43], предназначенные для реализации методов управления и контроля испытательных процедур. Несмотря на то, что многие задачи испытаний одинаковы для разных объектов контроля [50], наблюдается низкий уровень унификации автоматизируемых функций, который влечёт за собой существенные затраты на создание и эксплуатацию узкоспециализированных систем [38].

Как отмечается в ряде работ [98, 102], системы промышленных испытаний реализуются на нескольких уровнях взаимодействия с исследуемым оборудованием. На самом верхнем уровне расположены универсальные системы, предоставляющие механизмы выдачи управляющих воздействий и контроля получаемых данных. На нижнем уровне располагаются комплексы контрольно-проверочной аппаратуры (КПА), обеспечивающие механическое воздействие на отдельные объекты контроля и программное обеспечение, включающее терминал телеметрии и службы по обработке команд. В промышленных универсальных испытательных комплексах верхнего уровня используются различные языки представления методик испытаний, например, РАСКАТ (прикладной язык – Диполь), STEPS (язык PLUTO) и др. [16, 318]. КПА и программное обеспечение нижнего уровня создаются разработчиками оборудования и не имеют унифицированных представлений. Такие системы узко специализированы на конкретный объект контроля, не содержат в своём составе методов взаимодействия с имитационными моделями, построенными в системах технического моделирования, или собственных имитационных инструментов. В них отсутствуют методы автоматизации подготовки испытаний и анализа получаемых от объекта контроля данных.

В проведении испытаний участвуют аппаратно-программные комплексы, в состав которых входят контрольно-проверочная аппаратура [101] и программное обеспечение, позволяющее управлять различным технологическим оборудованием. Для исследования сложных объектов целесообразно создавать двухступенчатые системы: на нижней ступени использовать микро-ЭВМ, а на верхней – программное обеспечение для управления и обработки информации [40]. Первоочередная задача, которую необходимо решать при проектировании таких систем, связана с рациональным распределением функций между программным обеспечением нижней и верхней ступеней для создания унифицированного комплекса [236]. Методы построения контрольно-проверочной аппаратуры космических аппаратов рассмотрены в [52, 100, 101, 105]. В [105] показан вариант построения контрольно-проверочной аппаратуры для тестирования приёмников сигналов спутниковых радионавигационных систем, входящих в состав аппаратуры систе-

мы автономной навигации космических аппаратов. Разработано программное обеспечение имитатора навигационных сигналов спутниковых радионавигационных систем: ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BDS.

В работе [38] представлен архитектурный подход к созданию интегрированной автоматизированной системы управления технологическими процессами наземных испытаний, предназначенной для контроля и испытаний узлов, агрегатов и ракет космического назначения. Предложены агрегатные базовые технические и информационно-программные решения для создания автоматизированных систем поддержки испытаний (РКН «Протон-М»). Этот подход позволил построить интегрированную среду, обеспечивающую информационное взаимодействие специалистов, оперативный доступ к информационным ресурсам, электронный документооборот организационно-технической документации, и высокий уровень автоматизации всех элементов инфраструктуры испытаний. Построенное программное обеспечение имеет модульную структуру, поддерживает наращивание функционала без изменения базового программного обеспечения и выполняет автоматическое документирование, регистрацию и архивацию измерительной и технологической информации, а также результатов испытаний [38].

В процессе испытаний систем космического аппарата проверяются не только их конструкции, но и логика работы как отдельных систем, так и комплексов, образующихся при взаимодействии с внешней космической средой, смежными системами и центром управления полётами [222]. В [347] показана технология отладки программного обеспечения, устанавливаемого на бортовой комплекс управления. Тестирование выполняется с помощью специализированного отладчика, позволяющего считывать данные микроконтроллера и регистры процессора. Разработано программное обеспечение, обеспечивающее пошаговый процесс выполнения программ с визуализацией данных. Для поведения испытаний в полном объёме возникает необходимость в применении имитаторов сопряжённых устройств. Изготовление аппаратных имитаторов требует существенных затрат времени и ресурсов, поэтому их целесообразно заменять программными имитаторами. В этом случае для изучения свойств системы, понимания логики их работы,

актуально применение имитационных моделей объекта испытаний. Обращение к модели необходимо как на ранних этапах разработки, когда объект испытаний ещё отсутствует, так и на поздних, когда актуальными становятся вопросы сохранения ресурса, экономии времени и трудозатрат. В идеале испытательное оборудование должно иметь в своём составе мощные инструменты моделирования, поэтому в ряде работ решается задача интеграции технологий моделирования с инструментами анализа и верификации устройств [252].

Испытания проводятся по заранее подготовленной программе испытаний, в которой описано проведение механических, функциональных и других типов испытаний. Для каждого типа испытаний задаются спецификация, план проведения измерений, конфигурации испытательного и испытываемого оборудования, критерии оценки успешности испытаний. По завершении испытаний составляются отчёты, которые должны содержать результаты выполнения измерений, значения измеренных параметров оборудования и другую информацию о ходе выполнения испытаний. В основе систем управления испытаниями лежат специализированные языки, используемые для построения циклограмм, либо графические средства формирования сценариев. Выбор средства формирования испытательных процедур должен обеспечивать решение всех задач испытаний.

В первую очередь стоит отметить проблемно-ориентированный язык построения циклограмм – «Диполь» [3]. Структурным элементом языка являются директивы, описывающие различные этапы испытаний. Язык обладает следующими возможностями: максимальная проблемная ориентация, как в области синтаксиса, так и в области структуры, что делает написание циклограмм достаточно простым, использование для разработки циклограмм структурного редактора с древовидным представлением конструкций языка [16, 103].

Ещё один язык, нашедший своё применение в космической отрасли это ДРАКОН (Дружелюбный Русский Алгоритмический язык, Который Обеспечивает Наглядность) [177]. Язык разработан в рамках космической программы «Буря» (Научно-производственный центр автоматики и приборостроения им. акад. Н. А. Пилюгина, Москва; Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша).

Язык построен путём формализации, эргономизации и структуризации блок-схем алгоритмов. На базе ДРАКОНа построена автоматизированная технология проектирования программных систем ГРАФИТ-ФЛОКС, применяемая в некоторых крупных космических программах. Язык легко адаптируется под широкий класс задач, включая автоматизацию наземных испытательных комплексов. К его недостаткам, применительно к задачам автоматизации и визуализации испытаний, можно отнести сложность для конечного пользователя.

Для автоматизированных испытательных комплексов используется проблемно-ориентированный язык «БАЗИС» [91]. Его структура выполнена в виде таблиц, каждая строка которых представляет собой макрокоманду, предназначенную для управления объектом испытаний. Совокупность макрокоманд объединяется в логическую единицу, именуемую входом программы. Входы могут использовать коды других входов. Такой подход требует большой дисциплины от разработчика, чтобы соблюдать принципы структурного программирования.

Другим подходом к формальному описанию вариантов организации и реализации комплексной отладки при заданных целевых и критериальных установках является сценарий [127]. В данном исследовании применяется сценарный подход к организации программы испытаний. Инструменты формирования сценариев обеспечивают простоту, наглядность и информативность для построения испытательных процедур и методов мониторинга испытаний.

Рассмотрим примеры применения методов формирования испытательных процедур и построения автоматизированных систем испытаний. В работах [49, 67, 96] представлены методы наземной экспериментальной отработки систем космических аппаратов, применяемые в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва».

На основе языка «Диполь» разработана автоматизированная система управления и информационно-телеметрического обеспечения (АСУИТО) РАСКАТ в составе специализированного испытательного комплекса КАПРИ. В состав системы входят редактор и интерпретатор циклограмм, а также редактор мнемосхем [16]. На основе языка Диполь в ИПМ им. М.В. Келдыша разработана авто-

матризованная испытательная система (АИС) [4]. В этой системе каждый испытатель описывает свою часть испытаний в виде программы, которые объединяются в обобщённую программу, имеющую вид текстового файла. Центральная вычислительная машина интерпретирует эту программу и в соответствии с ней осуществляет необходимые действия под наблюдением оператора, контролирующего ход испытаний. Результаты всех элементарных актов испытаний сохраняются в файле протокола, доступном для последующего изучения [4].

В [96, 137, 138] описан «Лабораторный отработочный комплекс», который применяется для проведения испытаний бортового комплекса управления космическим аппаратом. В его состав входят аппаратная часть, включающая различные устройства преобразования, и программное обеспечение. С помощью аппаратуры испытательного комплекса моделируются сигналы и фиксируются результаты их прохождения. Организуется процесс, подобный штатному процессу эксплуатации прибора в составе космического аппарата. Имитируются управляющие воздействия блоков управления космических аппаратов и выдача в них команд с испытуемого прибора при контроле его физических характеристик. Программное обеспечение взаимодействует с LabView через файловый обмен, что позволяет привлекать инженеров, не владеющих знаниями профессиональных программистов [137, 138].

В [68] описан наземный отладочный комплекс (НОК) для отработки бортового программного обеспечения, который ускоряет процесс испытаний и позволяет имитировать различные нештатные ситуации работы бортового оборудования для исследования отказов отдельных блоков. НОК имитирует входные сигналы, поступающие на процессор бортовой аппаратуры, и регистрирует его выходные сигналы, эмулируя работу приборов в составе космического аппарата. Отработка испытаний без использования реальных технических средств обеспечивает полноту проверок всех предполагаемых ситуаций, возможных во время штатной работы приборов. Её результаты используются для объяснения работы бортового оборудования в условиях полёта, когда аппаратура недоступна для непосредственного наблюдения и контроля.

В [39] предложен способ описания состава элементов испытаний в виде синтаксических диаграмм. В [222] предложена технология полного переноса описания выполняемых действий, необходимых для проведения испытаний из программной реализации во внешний источник информации – сценарий испытаний, сохраняемый в реляционной базе данных. Используется текстово-графическая форма описания процесса испытаний, решается проблема обеспечения реального времени при автоматической обработке сценария. Результатом стало уменьшение затрат на подготовку и проведение испытаний.

В [67] рассмотрены принципы построения испытательного стенда БКУ. Схема прохождения информации на стенде объединяет все этапы подготовки, проведения и мониторинга испытаний. На своих рабочих местах конструкторы с помощью различных редакторов, документаторов подготавливают входные данные для испытаний. Система автоматического контроля параметров – «Дежурный контроль» в режиме реального времени выполняет оценку состояния заданных параметров.

В работе [295] представлен программный инструмент для оценки различных решений механической и электрической архитектуры компонентов космического корабля с целью удовлетворения технических требований и ограничений. Подход основан на методе численной автоматизации поиска проектов в пространстве концептуальных макетов. Инструмент используется как в качестве исследовательского стенда для тестирования различных методологий и алгоритмов оптимизации, так и в качестве рабочего пространства для команд инженерного проектирования. В [107] описано применение программных имитаторов при проверке блоков управления системы наведения антенн, которое позволило выявить сбои выдачи команд управления, связанные с приходом команды в момент обработки прибором информации о местоположении антенны.

В [49] рассматриваются проблемы исследования и верификации перспективных бортовых комплексов управления с сетевой организацией информационного обмена. Предложена методика параллельного контроля процессов и диагностики аномальных ситуаций вычислительного модуля в бортовой вычислительной сети.

В состав инструментов экспериментальной отработки и испытаний входят средства имитации каналов связи с наземным комплексом управления, средства имитации взаимодействий с бортовой аппаратурой, средства отладки программ, средства управления БКУ, автоматизированный испытательный комплекс, база данных испытаний и архив программ. Разработанные принципы и методики являются основой для проведения наземной экспериментальной отработки бортовых комплексов управления нового поколения. База данных испытаний и архив служат для хранения и использования программ и результатов отработки. Комплекс аппаратных средств выполнен на базе АПС ИК08 (ОАО «Информтест», Зеленоград, Москва).

В [20] рассмотрены принципы построения, состав и структура программных и аппаратных компонентов аппаратуры, предназначенной для управления оптико-электронным телескопическим комплексом и контроля его функционирования в ходе испытаний. В разработке использован SCADA-пакет GENESIS32 (Iconics, США). Обеспечение возможности модификации в процессе испытаний реализовано с помощью циклограмм, написанных на специальном языке управления, который является русифицированным диалектом Бейсика, расширенного проблемно-ориентированными объектами.

В [14] рассмотрена интеграция системы проведения испытаний с системой имитационного моделирования. Для моделирования различных процессов, управления аппаратными средствами и исследования реальных физических объектов применяется система LabView. Неоспоримым преимуществом использования LabView является возможность синтеза различных средств измерений в развитой среде графического программирования [17], в которую интегрируются драйверы приборов многих производителей. Функциональность построенной измерительной системы определяется пользователем в отличие от традиционных средств измерений, у которых функциональность определяется производителем. Использование в автоматизированной системе методов работы программными библиотеками LabView обеспечивает её гибкость, расширяемость и возможность оперативно реагировать на изменения требований к испытательным процедурам.

Примеры автоматизированных систем диагностики представлены в [240]. Системы «ТЕСТ-Д» и «ТДК-3» предназначены для диагностики и ремонта промышленных электронных устройств и представляют собой диагностические стенды, к которым можно подключать различные электронные платы и модули. Система «Пион» [202] содержит аппаратную часть и программное обеспечение для анализа и обработки данных. Система выполняет функции сбора данных, их хранения и анализ полученных значений. Анализ производится на основе метода фильтрации данных, суть которого состоит в том, что решение принимается на основании сопоставления входящих данных с комплексом заранее сформулированных независимых признаков, каждому из которых приписывается вес (важность). В [50] описан комплекс программных средств «Лотос», предназначенный для испытаний приборов, входящих в состав космического аппарата. Система является унифицированной и предназначена для автоматизации испытаний различных видов приборов и обеспечивает выполнение следующих функций: подготовку входных данных, автоматизированное проведение испытаний в режиме реального времени, непрерывный мониторинг состояния объекта контроля, формирование протоколов испытаний. Реализован метод отладки программного обеспечения для бортовой аппаратуры без использования реального прибора. Отладка производится на виртуальной модели прибора, реализованной в программе для автоматизированного проектирования Proteus. Схемы сложных устройств представляются в виде нейросетевых моделей. Устройство рассматривается в виде «чёрного ящика», который представляет собой модель, предсказывающую выходные параметры, полученные в ходе задания входных параметров и проведения численных экспериментов.

В [89] представлена автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата, которая позволяет произвести полный функциональный контроль отдельных устройств составе комплекса. В [188] описано программное обеспечение для автономной отработки подсистем блока управления космических аппаратов, которое состоит

из системы, формирующей управляющие воздействия и дополнительной системы, выполняющей контроль состояния регистров.

Комплексный подход к построению гибкой перенастраиваемой многофункциональной контрольно-измерительной системы показан в работах [74, 179, 192, 193]. Рассмотрены технологические принципы, которые легли в основу программного комплекса «ACTest» (ООО «Лаборатория автоматизированных систем»), предназначенного для автоматизации работ на исследовательских и испытательных установках, оснащённых контрольно-проверочной аппаратурой. Для построения испытаний используется универсальный интерфейс, основанный на применении динамически подключаемых библиотек, что позволяет создавать модули сопряжения с помощью различных средств и сред разработки. В программный комплекс входят: ACTest©-Composer – создание, изменение, поиск, хранение и запуск сценариев экспериментов, ACTest©-Registrar – подсистема сбора и регистрации в реальном времени, ACTest©-Visualizer – средства визуализации, ACTest©-Analyzer – обработка и анализ результатов, включая программы математической обработки, различные варианты экспорта и импорта данных, ACTest-Calibrator© – тарировка и информационное сопровождение измерительных каналов [192].

Важным вопросом исследования является контроль и верификация построенных программ проведения испытаний. В [37] для верификации циклограмм предложена формальная модель типового процесса проведения испытаний. Верификация выполняется на основе базы знаний, отражающей последовательности наступления различных событий путём сопоставления циклограммы испытаний с базовой моделью.

Проведённый обзор технологических подходов к автоматизации испытаний показал узконаправленность существующих программных решений и ограниченность расширения их испытательных функций и тем самым не обеспечивает построение цифровых двойников сложных технических систем. Автоматизированная поддержка, предоставляемая существующими системами, не рассматривает проблемы подготовки испытаний и анализа результатов в тесной интеграции с

имитационными моделями функционирования объекта контроля. Адаптация автоматизированных систем на заданную предметную область с возможностями моделирования, наглядного построения испытательных процедур, реализации методов контроля приёма и передачи данных по заданным стандартам является трудоёмкой и зачастую невыполнимой задачей.

Диссертационная работа предлагает собственные подходы к обеспечению базовых составляющих концепции цифровых двойников и решает вопросы прототипирования и представления состояния и поведения физического объекта. В её основе лежит создание новой технологии, которая обеспечит построение интеллектуальных имитационных моделей функционирования бортовых систем, объединяющих базы знаний и виртуальные инструменты, сбор и накопление данных о текущем состоянии исследуемых устройств и их применение для исследования бортовых систем при различных вариантах и режимах их функционирования. Новая технология должна поддерживать современные архитектурные и программные подходы, рассмотренные в настоящем обзоре. В их числе расширяемость измерительных возможностей, поддержка двухуровневой архитектуры взаимодействия специализированных измерительных методов и универсальных сценариев испытательных процедур, автоматизация задач подготовки и проведения испытаний, а также анализа их результатов, интеграция с имитаторами бортовых систем и окружения. Создание технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем должно позволить строить проблемно-ориентированное программное обеспечение, выполняющее подготовку испытаний, передачу испытательных процедур в измерительную аппаратуру, формирование критериев контроля и задание способов визуализации результатов, что повысит качество и сократит сроки проведения испытаний нового оборудования.

1.3. Задачи диссертационной работы

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, позволяющих формализовать и применять знания специалистов предметной области для исследования проектных решений на основе имитационных моделей;

4. Разработка методов анализа функционирования бортовых систем на основе интеллектуальной имитационной модели для подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов;

5. Разработка методов подготовки испытательных процедур командно-программного управления космическим аппаратом на основе интеллектуальных имитационных моделей 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.

1.4. Выводы к главе 1

Выполнено исследование системной проблемы повышения эффективности процессов производства бортовой аппаратуры космических аппаратов и показана необходимость цифровой трансформации, обеспечивающей перенос итерационных процессов проектирования устройств 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.

Проведён обзор технологий, которые могут применяться для построения цифровых двойников, включающих подходы к построению моделей, сбору аналитики по испытаниям реальных устройств и созданию баз знаний, отражающих отраслевые особенности производства бортовых систем космических аппаратов. Выделены особенности построения и применения имитационных моделей для

поддержки исследования сложных технических систем. Рассмотрены примеры успешного применения методов искусственного интеллекта в таких исследованиях. Показано, что построение баз знаний, отражающих функциональные и технологические процессы, позволяет обмениваться опытом между группами инженеров и является ключевым фактором, создающим предпосылки для успешного выполнения сложных проектов. Технология должна обеспечивать графические методы построения моделей, методы формирования их функционального представления, методы проведения и визуализации имитационных экспериментов.

Для оценки разработанных бортовых систем и анализа их соответствия техническим требованиям требуется создание методов и проблемно-ориентированных систем, обеспечивающих проведение испытаний бортовой аппаратуры, узлов или отдельных блоков и системы в целом, включая средства взаимодействия с бортовой системой, методы отображения информации, а также имитаторы устройств, с которыми взаимодействует система. При создании таких систем требуется семантическая ориентация на предметную область, включая работу со специализированными типами данных, отражающими такие понятия, как телеметрическая информация, команда управления, массив командно-программной информации, разовая команда, квитанция и другие. Сложность задачи, затрудняющая применение типовых средств автоматизации, заключается в необходимости проектировать и исследовать поведение компонентов бортовых систем, учитывая множества связей, режимов работы и команд управления при отсутствии универсальных проектных решений, унифицированных протоколов информационного взаимодействия и высокой стоимости экспериментальных испытаний.

Показано, что существующего уровня развития цифровых технологий и их интеграции недостаточно для построения и применения базовых компонент цифровых двойников при проектировании, разработке и испытаниях бортовых систем космических аппаратов в случае, когда требуется анализировать не только физические характеристики устройств, но и сложную логику их функционирования и взаимодействия с сопряжёнными системами. Отсутствие единой технологической

основы не позволяет обеспечить функциональную преемственность информационных ресурсов и унификацию программных решений, необходимых для организации научно-производственных процессов и автоматизации всех этапов жизненного цикла разработки бортовой аппаратуры космического аппарата. Цифровая поддержка, предоставляемая существующими подходами, не рассматривает проблемы подготовки испытаний и анализа результатов в тесной интеграции с имитационными моделями функционирования объектов контроля. Их адаптация на заданную предметную область с возможностями моделирования, наглядного построения испытательных процедур, расширения измерительных функций, реализации методов контроля приёма и логических правил передачи и обработки данных является трудоёмкой и зачастую невыполнимой задачей.

Показана необходимость создания новой технологии, обеспечивающей формализованные подходы к построению и применению базовых компонент цифровых двойников для поддержки научно-производственных процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов. Обоснована необходимость интеграции на основе единых технологических подходов интеллектуальных, информационных и графических инструментов с целью сокращения и упрощения трудоёмких и дорогостоящих натурных испытаний.

Новая технология должна поддерживать 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. Новая технология должна обеспечивать функциональную преемственность информационных ресурсов от инструментов моделирования к методам автоматизации испытаний для проектирования и анализа готовых устройств. Технология направлена на создание проблемно-ориентированных систем, предназначенных для моделирования, подготовки испытаний, управления измерительной аппаратурой, формирования критериев контроля, задания спосо-

бов визуализации результатов. Новая технология должна поддерживать современные архитектурные и программные подходы, в их числе расширяемость измерительных возможностей, поддержку двухуровневой архитектуры взаимодействия специализированных измерительных методов и универсальных сценариев испытательных процедур, интеграции с имитаторами бортовых систем и окружения, представляющих собой цифровые двойники функционирования бортовых систем.

На основании проведённого анализа системной проблемы и существующих подходов к её решению сделан вывод об актуальности темы диссертационного исследования и сформулированы задачи диссертационной работы.

ГЛАВА 2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ЕЕ ПОСТРОЕНИЯ

2.1. Формализация понятия интеллектуальной имитационной модели

Выполнена формализация понятия интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовой системы, что позволило применить формальный подход к созданию цифровых двойников и их применение для проектирования, разработки и испытаний бортовых систем [76]. 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 как формализованные знания специалистов предметной области, представленные в виде продукционных правил, так и извлечённые зависимости из методик испытаний бортовых систем и результатов натурных экспериментов.

Интеллектуальная имитационная модель S определяется как

$$S = \langle G, F, T \rangle,$$

где G – структурно-параметрическое описание (множество элементов структуры представляемой бортовой системы), F – функциональное описание (множество способов функционирования), T – моменты времени наблюдения (таймеры) [83, 85, 301]. Такое представление выполняет разделение между представлением знаний и их использованием, что обеспечивает расширяемость методов работы моделей.

Структурно-параметрическое описание модели

$$G = \langle B, I, C, D, P \rangle,$$

где B – множество элементов модели, имитаторы отдельных устройств, I – множество коммутационных интерфейсов элементов, C – множество коммутацион-

ных соединений между элементами модели, D – множество структур данных, P – множество параметров [81].

Множество элементов $B = \cup B_i$, где $B_i = \langle N_i, E_i, I^i, X^i, Y^i \rangle$, $i = [1, \dots, |B|]$, $|B|$ – 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 $I^i = (\cup I_{qi}^i) \subseteq I$ – подмножество коммутационных интерфейсов для элемента модели B_i , где $qi = [1, |I^i|]$ – количество точек входов и выходов. Интерфейс I_n^i имеет характеристики: тип интерфейса $Tr(I_n^i)$, направленность передачи $Rt(I_n^i)$ и признак состояния $Onf(I_n^i)$.

Множество $C = \cup C^{ij}$ – всех соединений элементов модели, где C^{ij} – коммутационные интерфейсы между B_i и B_j . $C^{ij} = \cup C_{nm}^{ij}$, где $C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j \rangle$ – соединение элементов B_i и B_j по интерфейсам I_n^i и I_m^j . Интерфейсы I_n^i и I_m^j – связанные, через них происходит взаимодействие элементов B_i и B_j . Для коммутационных соединений C_{nm}^{ij} , предназначенных для передачи данных, задаётся параметр τ , влияющий на прохождение сигнала между интерфейсами (например, вероятность потери сигнала). Соединение C_{nm}^{ij} однозначно определяет два элемента B_i и B_j и интерфейсы их взаимодействия I_n^i, I_m^j .

Предложены критерии корректности структуры модели:

1. $\forall (C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j \rangle) Tr(I_n^i) = Tr(I_m^j)$ – соединение допустимо только по однотипным интерфейсам.
2. $\forall (C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j \rangle) Rt(I_n^i) \neq Rt(I_m^j)$ – соединение выполняется только для разнонаправленных интерфейсов.

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 позволяют 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, как правило, построенные с применением какой-либо среды технического моделирования.

Каждое правило $R_l\in R$ задаёт конструкцию $R_l: A^l\rightarrow Z^l$, где $A^l=A_1\&A_2\&\dots\&A_r$ – логическое выражение, определяющее условие выполнения правила (антецедент), $Z^l=Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ – действия, изменяющее состояние модели (консеквент). Антецедент и консеквент представляют собой выражения с параметрами, заданными в структурно-параметрическом описании. Выражение $A^l=\langle I^l, X^l, K^l, T^l \rangle$, 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 $Z^l=\langle I^l, Y^l, K^l, T^l \rangle$ – задаёт изменение состояния элементов модели: передачу данных на интерфейсы из I , определение выходных параметров из Y , запуск таймеров. Антецеденты всей базы знаний описываются множеством $A=\langle I^A, X^A, K^A, T^A \rangle$, где $I^A\subseteq I$, $X^A\subseteq X$, $K^A\subseteq K$, $T^A\subseteq T$. Консеквенты – $Z=\langle I^Z, Y^Z, K^Z, T^Z \rangle$, где $I^Z\subseteq I$, $X^Z\subseteq X$, $K^Z\subseteq K$, $T^Z\subseteq T$. Заметим, что в общем случае $K^A\cap K^Z\neq\emptyset$ 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 . $R^i=\cup R_j^i$, то есть для $\forall (R_j^i: A_j^i\rightarrow Z_j^i) \exists B_i \mid R_j^i\in R^i$.

Формализация обеспечивает построение базовых элементов цифровых двойников и предоставляет инструменты для автоматического построения и анализа моделей.

2.2. Свойства модели и операции над элементами модели

Мощность множества M определим как количество элементов $m_i \in M$, обозначим как $|M|$. Например, $|B|$ – мощность множества элементов модели, $|C|$ – мощность множества коммутационных соединений. *Мощность множества коммутационных интерфейсов* определим как $\sum_i |I^i|$, где I^i – интерфейсы B_i , обозначим $|I|$. *Мощность множества правил для элемента модели* B_i определим как количество правил R^i в базе знаний, заданных для B_i , обозначим как $|R^i|$.

Операции с моделью сформулированы с помощью реляционной алгебры, что позволяет формализовать и автоматизировать построение и анализ моделей. Пусть заданы множества свойств: $M^1, M^2, \dots, M^i, \dots, M^p$ и кортеж значений свойств $Q = \langle M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_p \rangle$, где $M_1 \subseteq M^1, M_2 \subseteq M^2, \dots, M_i \subseteq M^i, \dots, M_p \subseteq M^p$.

Проекция $Pr(Q, M^i) = M_i$ – i -ая компонента кортежа Q . Например, для того, чтобы выбрать все команды, для которых есть правила их приёма, нужно выполнить проекцию антецедентов правил $A = \langle I^A, X^A, K^A, T^A \rangle$ на множество команд K : $Pr(A_k, K) = \{k_i \in K^A\}$.

Мощность множества правил, в которых участвует интерфейс I_n^i элемента модели B_i вычисляется как количество элементов в проекциях $Pr(A, I_n^i)$ и $Pr(Z, I_n^i)$, то есть $|R(I_n^i)| = |Pr(A, I_n^i) \cup Pr(Z, I_n^i)|$.

Выборкой $Sel(Q, \theta)$ назовем множество элементов 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 . Пусть для правил, описывающих поведение элемента модели B_i , существует цепочка правил Rch^i , а для B_j – Rch^j . Будем говорить, что цепочки правил Rch^i и Rch^j находятся в *отношении за-*

зависимости, обозначим его – $Dep(Rch^i, Rch^j)$, если выполнение Rch^i влечёт выполнение Rch^j (логический вывод). Отношение зависимости не симметрично, то есть $Dep(Rch^i, Rch^j) \neq Dep(Rch^j, Rch^i)$.

Если существуют Rch^i и Rch^j , такие что $Dep(Rch^i, Rch^j)$, то $Rch^i \cup Rch^j$ – метод взаимодействия элементов модели B_i и B_j . Обозначим $FMod(B_1, \dots, B_p) = Rch^1 \cup Rch^2 \cup \dots \cup Rch^p$, такое что $\forall i \exists j \mid Dep(Rch^i, Rch^j)$ или $Dep(Rch^j, Rch^i)$ $i, j \in [1, \dots, p]$. $FMod(B_1, \dots, B_p)$ описывает один из режимов взаимодействия множества элементов модели $B_1, \dots, B_p$. Отношение зависимости Dep определяет частичный порядок на множестве $FMod$.

Объединение зависимых цепочек правил не выходит за пределы базы знаний $FMod(B_1, \dots, B_p) \subseteq R$. Объединение всех зависимых цепочек может не совпадать с базой знаний при наличии элементов с автономным функционированием, то есть $\cup FMod(B_1, \dots, B_p) \neq R$ для $(\forall B_i) i \in [1, \dots, |B|]$.

Утверждение. Если $FMod(B_i, B_j) \neq \emptyset$, то $\exists C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle \mid I_n^i \in Pr(Z^i, I)$ и $I_m^j \in Pr(A^j, I)$, где Z^i – консеквенты Rch^i , A^j – антецеденты Rch^j .

Доказательство: Из того, что $FMod(B_i, B_j) \neq \emptyset$ следует, для B_i, B_j существуют Rch^i, Rch^j и выполняется $Dep(Rch^i, Rch^j)$. Логический вывод в B_i вызывает переход к логическому выводу в B_j . Для этого должен существовать путь взаимодействия между B_i и B_j , то есть соединение C_{nm}^{ij} . Переход логического вывода от B_i в B_j задан в правилах базы знаний $Rch^i \cup Rch^j \subseteq R$. То есть, $\exists (R_i: A_i \rightarrow Z_i) \in Rch^i$, которое задаёт передачу данных через интерфейс I_n^i элемента B_i . Для этого I_n^i должно входить в Z_i . Реакция элемента на переход также определяется правилами. То есть, $\exists (R_j: A_j \rightarrow Z_j) \in Rch^j$ в котором задано получение данных элементом B_j по интерфейсу I_m^j . Это означает, что I_m^j входит в A_j . Следовательно, если $FMod(B_i, B_j) \neq \emptyset$, то $I_n^i \in Pr(Z^i, I)$ и $I_m^j \in Pr(A^j, I)$.

Для того, чтобы $FMod(B_i, B_j) \neq \emptyset$, необходимо, чтобы существовали $Rch^i \subseteq R^i$ и $Rch^j \subseteq R^j$, где R^i правила B_i , R^j правила B_j , такие что $Dep(Rch^i, Rch^j) \cup Dep(Rch^j, Rch^i) \neq \emptyset$ или существовал элемент B^p с правилами базы знаний R^p и такая цепочка правил $Rch^p \subseteq R^p$, что $Dep(Rch^i, Rch^p) \cup Dep(Rch^p, Rch^j) \neq \emptyset$.

Коммутационное соединение C_{nm}^{ij} определяет путь передачи информации между элементами B_i и B_j , обозначим его $L(I_n^i, I_m^j)$. Путь $L(I_n^i, I_m^{i+l})$ задает последовательность передачи информации между элементами $B_i, B_{i+1}, \dots, B_{i+l}$.

2.3. Семантическая интерпретация формального описания модели

Предлагается 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. Модель предназначена для моделирования логики информационного взаимодействия сложных систем, для которых не удаётся построить строгую математическую модель и необходимо использовать знания специалистов предметной области о способах их функционирования.

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, которое описывается параметрами из Y (Рисунок 5).

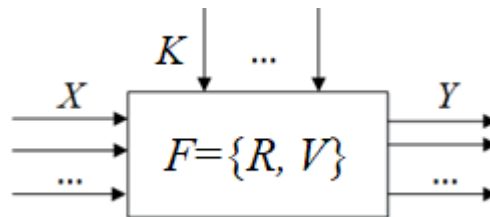


Рисунок 5 – Элемент модели

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 [139, 302]. Независимо от способа реализации функционального представления элементов модели для их интеграции формируются структурно-параметрические описания $\langle B, I, C, D, P \rangle$, определяющие компоненты унификации [155, 311]. Предусмотрен параметрический способ интеграции, при котором antecedentes из A правил базы зна-

ний R формируются на основе выходных параметров Y методов V или консеквенты Z правил задают входные параметры X для методов V .

Утверждение. $\forall B_i V^i \cup R^i \neq \emptyset$.

Доказательство: Каждый элемент модели имеет функциональное описание, заданное либо в базе знаний R , либо в виде функциональных зависимостей из V . Причём, для B_i функциональное представление $F^i \subseteq F$ обязательно, то есть $F^i \neq \emptyset$. По определению, $F^i = Pr(F^i, V) \cup Pr(F^i, R) \neq \emptyset$, $Pr(F^i, R) = R^i$, $Pr(F^i, V) = V^i$. Из таблицы

истинности для F^i получаем допустимые состояния для V^i и R^i :

$$\begin{cases} V^i \neq \emptyset \text{ и } R^i \neq \emptyset, \\ V^i = \emptyset \text{ и } R^i \neq \emptyset, \\ V^i \neq \emptyset \text{ и } R^i = \emptyset. \end{cases}$$

Случай, когда $V^i = \emptyset$ и $R^i = \emptyset$ противоречит условию: $F^i \neq \emptyset$. Полученные варианты совпадают с таблицей истинности для выражения $V^i \cup R^i = \emptyset$. Если $Y^i = V^i(X^i) \neq \emptyset$, то $Pr(R^i, X^i) \neq \emptyset$ и $Pr(R^i, Y^i) \neq \emptyset$. Это следует из используемого способа интеграции по параметрам для методов, входящих в функциональное представление F .

Взаимодействие между элементами модели выполняется с помощью коммутационных соединений (Рисунок 6), которые передают данные и иницируют работу модели.

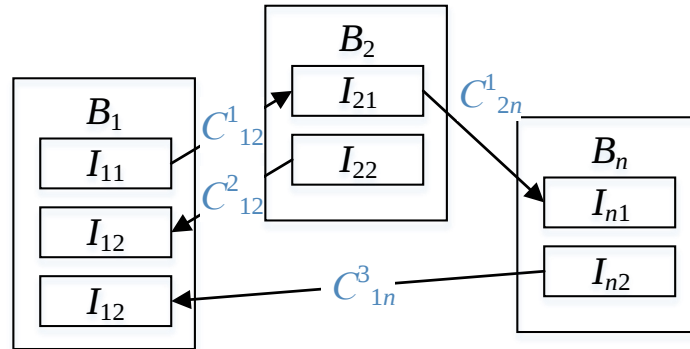


Рисунок 6 – Коммутационные соединения элементов модели

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 $I^i = I_1^i \cup \dots \cup I_{qi}^i$ и коммутационные соединения $C = \cup C^{ij}$.

Предлагается интерпретация признаков коммутационных интерфейсов, определяющая направления передачи данных и состояние интерфейсов: $Rt(I_{qi}^i) \subseteq \{Bx, Icx\}$ – входящие (Bx) или исходящие (Icx); $Onf(I_{qi}^i) \subseteq \{Bкл, Bыкл\}$ – возможна передача данных ($Bкл$) или передача невозможна ($Bыкл$).

Вводятся критерии контроля базы знаний:

1. Для входного интерфейса должно быть правило приема данных: $\forall (I_n^i \in I)$ если $Rt(I_n^i) = \langle Bx \rangle$ то $Sel(A^i, I = I_i) \neq \emptyset$.
2. Для исходящего интерфейса должно быть задано правило передачи данных: $\forall (I_n^i \in I)$ если $Rt(I_n^i) = \langle Icx \rangle$ то $Sel(Z^i, I = I_i) \neq \emptyset$.
3. Для изменения состояния интерфейса в базе знаний должны быть правила: $\forall (I_n^i \in I)$ если $Sel(A^i, Onf(I_{qi}^i)) \neq \emptyset$, то $Sel(A^i, \neg Onf(I_{qi}^i)) \neq \emptyset$.

Типизация коммутационных интерфейсов производится в терминах предметной области: $Tr(I_{qi}^i) \subseteq \{RS-232, RS-422, MKO, BЧ, имп., рел., num.\}$ – обозначения: релейный (*рел.*), импульсный (*имп.*), recommended standard 232 (*RS-232*), recommended standard 422 (*RS-422*), высокочастотный (*ВЧ*) и мультиплексный канал обмена (*MKO*), интерфейс для управления источниками питания (*num.*). Типизация интерфейсов определяет единые правила информационного взаимодействия и обработки данных, передаваемых по однотипным интерфейсам.

На рисунке показан пример графической интерпретации модели, представляющий конфигурацию логически связанных систем командно-телекоммуникационного взаимодействия (Рисунок 7).

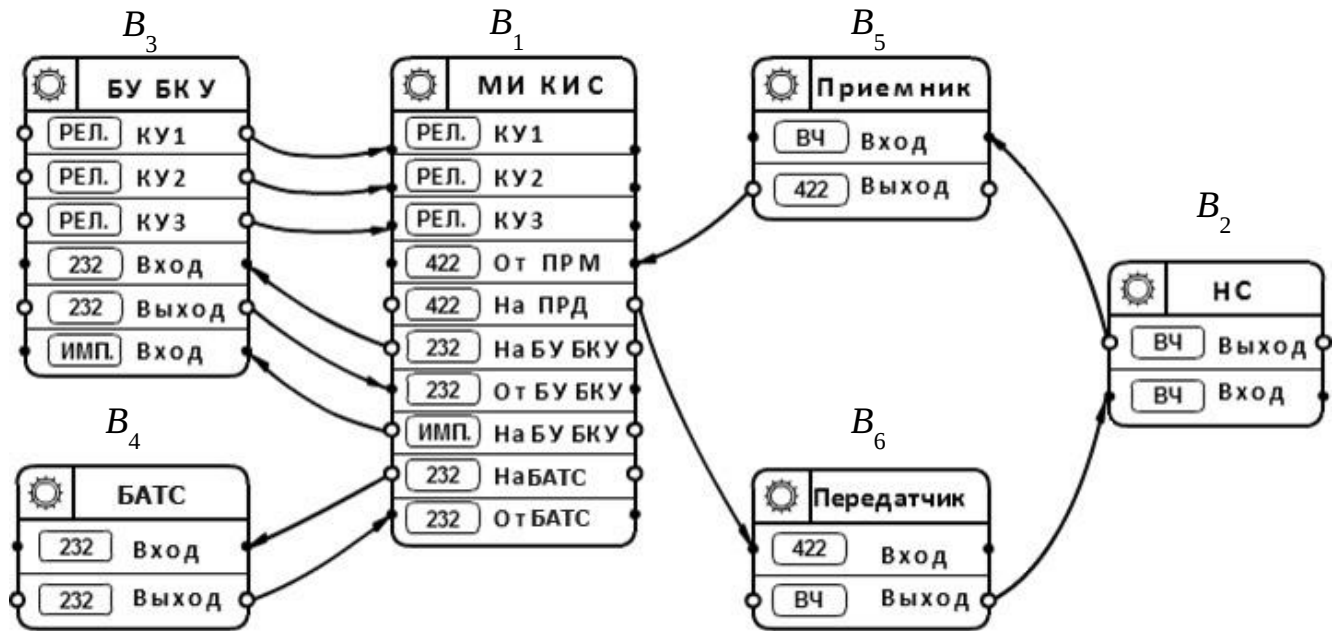


Рисунок 7 – Фрагмент структуры модели

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 ($\bullet$ – «Вх», $\circ$ – «Исх») – направления передачи данных. Функционирование каждого блока реализуется базой знаний или виртуальным инструментом, взаимодействие описывается протоколами, между блоками передаются специализированные структуры данных – пакеты команд и телеметрической информации.

Выполнена семантическая интерпретация данных, передаваемых по типизированным коммутационным интерфейсам. 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.

Предлагается семантическая интерпретация правил базы знаний, описывающих различные действия элементов модели. Передача данных представляется правилами вида: $\langle A_1 \rightarrow Z_{11}, Z_{12} \rangle$, где $A_1 = \langle \text{«По интерфейсу } I_{11} \text{ получены данные»}$, $Z_1 = \langle \text{«Записать данные в переменную } P_1 \rangle$, $Z_2 = \langle \text{«Передать на интерфейс } I_{12} \text{ переменную } P_1 \text{ длиной } n \text{ байт начиная с } m\text{-го»}$. Свойства интерфейсов I_1, I_2 $Rt(I_{11}) = \langle \text{«Вх»}$, $Rt(I_{12}) = \langle \text{«Исх»}$, $Onf(I_{11}) = Onf(I_{12}) = \langle \text{«Вкл»}$, $Tr(I_{11}) = Tr(I_{12})$.

Изменение настроек элементов модели или режимов работы, на основе поступающих команд управления, задаётся правилами вида: $\langle A_{21} \& A_{22} \& A_{23} \rightarrow Z_{21}, Z_{22} \rangle$, где $A_{21} = \langle \text{«По интерфейсу } I_2 \text{ получены данные»}$, $A_{22} = \langle \text{«Полученный массив байт = } k \rangle$, $A_{23} = \langle \text{«} k \in K \rangle$, $Z_{21} = \langle \text{«Выполнить команду } k \rangle$, $Z_{22} = \langle \text{«Изменить значение переменных } P_{31} \dots P_{3n} \rangle$.

Управление режимами представляется в виде: $\langle A_{31} \& A_{32} \& A_{33} \rightarrow Z_{31}, Z_{32} \rangle$, где $A_{31} = \langle \text{«По интерфейсу } I_3 \text{ получены данные»}$, $A_{32} = \langle \text{«Переменная } P_3 = \text{«Режим выключен»}$, $A_{33} = \langle \text{«Полученный массив байт = переменная } P_3 \text{ (контроль запроса)}$, $Z_{31} = \langle \text{«Запустить таймер } T \rangle$, $Z_{32} = \langle \text{«Переменная } P_3 = \text{«Режим включен»}$.

Выполнение действий по таймеру задаётся правилами вида: $\langle A_{41} \& A_{42} \rightarrow Z_{41}, Z_{42} \rangle$, где $A_{41} = \langle \text{«Сработал таймер } T \rangle$, $A_{42} = \langle \text{«Переменная } P_4 \text{ (действия по таймеру)} \neq \emptyset \rangle$, $Z_{41} = \langle \text{«Передать значение переменной } P_4 \rangle$, $Z_{42} = \langle \text{«Запустить таймер } T \rangle$.

Выполнена оценка сложности создания модели: $C_S = C_G + C_F$, где C_G – сложность построения структурно-параметрического описания, C_F – функционального описания (число операций). Сложность $C_G = |B| + |I| + |D| + |P| + \sum_{i=1}^{|B|} I^i (|I| - I^i) \approx O(|I|^2 + |P|)$. Сложность $C_F = C_V + |B| \sum_{i=1}^{|B|} |I^i| \cdot |P^i| \cdot const$, где C_V – сложность алгоритмов в V , $const$ – среднее число действий на одно правило базы знаний.

Предложенные способы семантической интерпретации формальных структур интеллектуальной модели позволяют создавать различные варианты конфигурации и работы бортовых систем, объединяя базовые компоненты цифровых двойников в имитаторы устройств, описывать пути и направления их взаимодействия для моделирования функций бортовой аппаратуры космического аппарата.

2.4. Эвристический метод построения модели

Под термином *Метод* понимается способ исследования, определяющий совокупность правил, предназначенных для решения задачи или достижения цели. Представление метода имеет алгоритмический вид и заключается в определении его содержания, направленности, применимости и выполняется по следующему плану: назначение метода; область применения; ограничения; описание метода (включает последовательность действий, алгоритмы, блок-схемы, инструкции); сложность метода; интерпретация результатов.

Назначение метода. Метод предназначен для построения модели S путём выполнения последовательности преобразований $S^1, S^2, \dots, S^n$, которые отражают пошаговое приближение к целевому объекту S^0 . Он упрощает создание интеллектуальных моделей – цифровых двойников функционирования бортовых систем.

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

Ограничения. Метод является адаптацией алгоритма A^* [116], 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 [148, 213]. Её суть заключается 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 . 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 .

Процесс построения модели S предполагает пошаговое приведение модели к состоянию, подобному системе-оригиналу в соответствии с целевым назначением [31]. На первом шаге построенная модель отображает лишь некоторые функции

исходного объекта, далее к ней применяются следующие усовершенствования [256]: детализация существующих компонентов исходной модели или расширение модели для включения других элементов, которые ранее не моделировались, но необходимы для представления реальной системы. Пошаговое построение модели позволяет сформировать упрощённый образ оригинала, который точно передаёт состояние и функции исходной системы в рамках свойств и характеристик, необходимых для удовлетворения целей её построения.

Положим, что моделирующее отображение q выполняет построение множества G , входящего в формальное представление модели и содержащее структурно-параметрическое описание её элементов. Отображение q обеспечивает упрощение системы S^0 путём исключения компонентов структуры и коммутационных связей, сохраняя свойства модели S^1 в объёме, достаточном для описания системы в соответствии с её целевым назначением, $q(S^0)=S^1=<G, F=\emptyset, T>$. Отображение q отвечает за формирование множеств элементов B , интерфейсов I , соединений C , параметров P в моменты времени T . Модель S^1 , содержит структурно-параметрическое описание и формирует семантический уровень представления модели, то есть такое её представление, которое, с одной стороны, характерно для моделируемой предметной области и, с другой стороны, имеет интерпретацию в графических элементах имитационной модели. Определим гомоморфное отображение r , применяемое к упрощённой структуре S^1 , как отображение для формирования функционального представления модели, заданного множеством F . Отображение r формирует способы имитационного моделирования функций исходной системы с учётом входных переменных X , команд управления K и внешних воздействий W для получения выходных параметров Y . Результатом применения отображений $r(q(S^0))_v$ является система S , которая обобщает или агрегирует систему S^0 , но, вместе с тем, отражает функционирование системы-оригинала на основании учёта целей моделирования v .

Формулировка задачи поиска в пространстве состояний включает набор переменных, которые описывают текущее состояние, набор действий, выполнение

которых изменяет значения этих переменных, и состояние модели [351]. Алгоритм A^* использует эвристическую функцию оценки, позволяющую сосредоточить усилия поиска на состояниях, которые ближе к цели, обеспечивая оптимальное решение [249]. Несмотря на то, что в большинстве случаев размер пространства достижимых состояний растёт экспоненциально по отношению к размеру задачи, этот подход успешно применяется благодаря исследованию независимых эвристик и методов обрезки, которые помогают уменьшить число состояний, рассматриваемых на каждом шаге.

Эвристическая функция строится на основе критериев оценки структуры и функционирования модели [213]. Вычисления показателей, характеризующих структуру модели, выполняется по преобразованию q : $Ad(S) = Ad(q(S^0))$, оценка функционирования – по построению отображения r : $Ef(S) = Ef(r(S^0))$. Построение модели выполняется путём пошагового преобразования её структуры и дополнения методов функционирования до достижения заданных экспертом оценок. Для выбора последовательности преобразования модели применяется дерево допустимых изменений, определяющее переходы от текущего состояния модели к последующим состояниям (Рисунок 8).

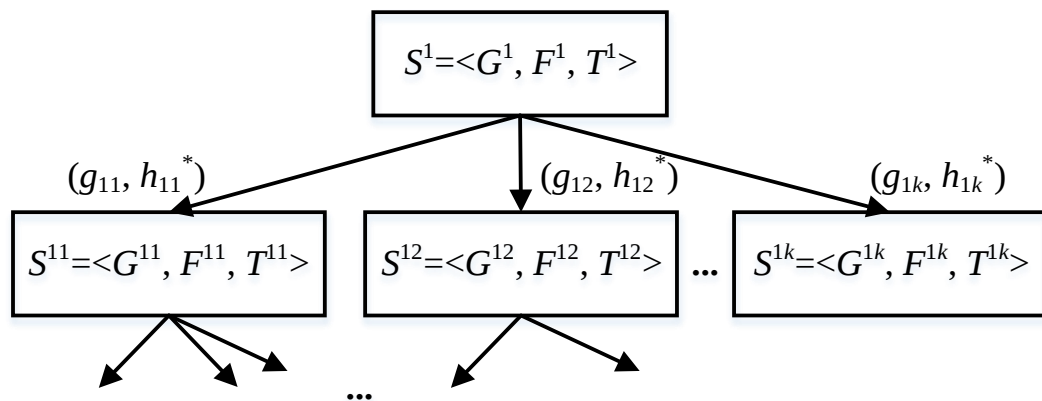


Рисунок 8 – Дерево допустимых изменений модели

Пусть имеется начальная модель S^1 , каждое изменение модели обозначим через S^k ($k = 2, \dots, n$). Первый уровень дерева содержит изменения элементов структуры модели и методов их функционирования на один шаг. Каждое последующее преобразование отображается отдельной ветвью. Для сокращения дерева измене-

ний и выбора наилучшего варианта модели применяется алгоритм эвристического поиска A^* . Требуется найти состояние S^k , удовлетворяющее заданным критериям оценки. Введём эвристическую функцию оценки узлов в дереве изменений: $g(S^k) + h^*(S^k)$, 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 . Определим функцию g как оценку соответствия структуры модели относительно целевого представления V . Функция g имеет вид: $g(S^k) = Ad(S^k)/Ad(v)$, где Ad – значения показателя, вычисляемого по структуре модели. Эвристическую функцию h^* зададим в виде: $h^*(S^k) = Ef(S^k)/Ef(v)$, 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 метода выбирается путь по дереву, обеспечивающий лучшее значение функции $g(S^k) + h^*(S^k)$.

Дерево строится на несколько уровней в глубину, выполняется расчет показателей полученных вариантов, на основе которой развивается наиболее перспективная ветвь дерева (стратегия поиска в глубину). К данной постановке задачи применяется метод выбора на основе шаблонов [261, 277], представляющих собой абстракции, определяющие ключевые переменные, влияющие на изменение состояния. Шаблонами являются цепочки правил, выполняемые при приеме, получении, квитировании и отработке команд управления бортовой аппаратурой: Rch^i , $Rch^i \subseteq R \mid Rch^i = Sel(R, K = k_i)$ и $Dep(Rch^i, Rch^j)$. Применение шаблонов упрощает построение дерева изменений модели.

Алгоритм построения модели использует дерево допустимых изменений и шаблоны зависимых цепочек правил (Рисунок 9). Выполнение алгоритма начинается с формирования предварительного описания модели S^1 . Выполняется сбор и консолидация исходной информации о назначении, характеристиках, условиях и способах работы моделируемой командно-измерительной системы. Далее выполняется выбор критериев для оценки модели. Требуется определить, какие крите-

рии будут наиболее значимыми при данной реализации модели и могут изменяться в зависимости от целевого назначения V . После выбора способов оценки строится модель в начальном приближении, учитывающая лишь некоторые свойства и аспекты моделируемой системы. Выполняется упрощение структуры объекта моделирования, определение элементов модели и коммутационных связей, описание параметров. Такая модель удовлетворяет в достаточной мере целям исследования. Выполняется вычисление показателей адекватности построенной структуры модели. Если необходимые значения показателей не достигнуты, модель не адекватна оригиналу (в должной степени), выполняется её изменение.

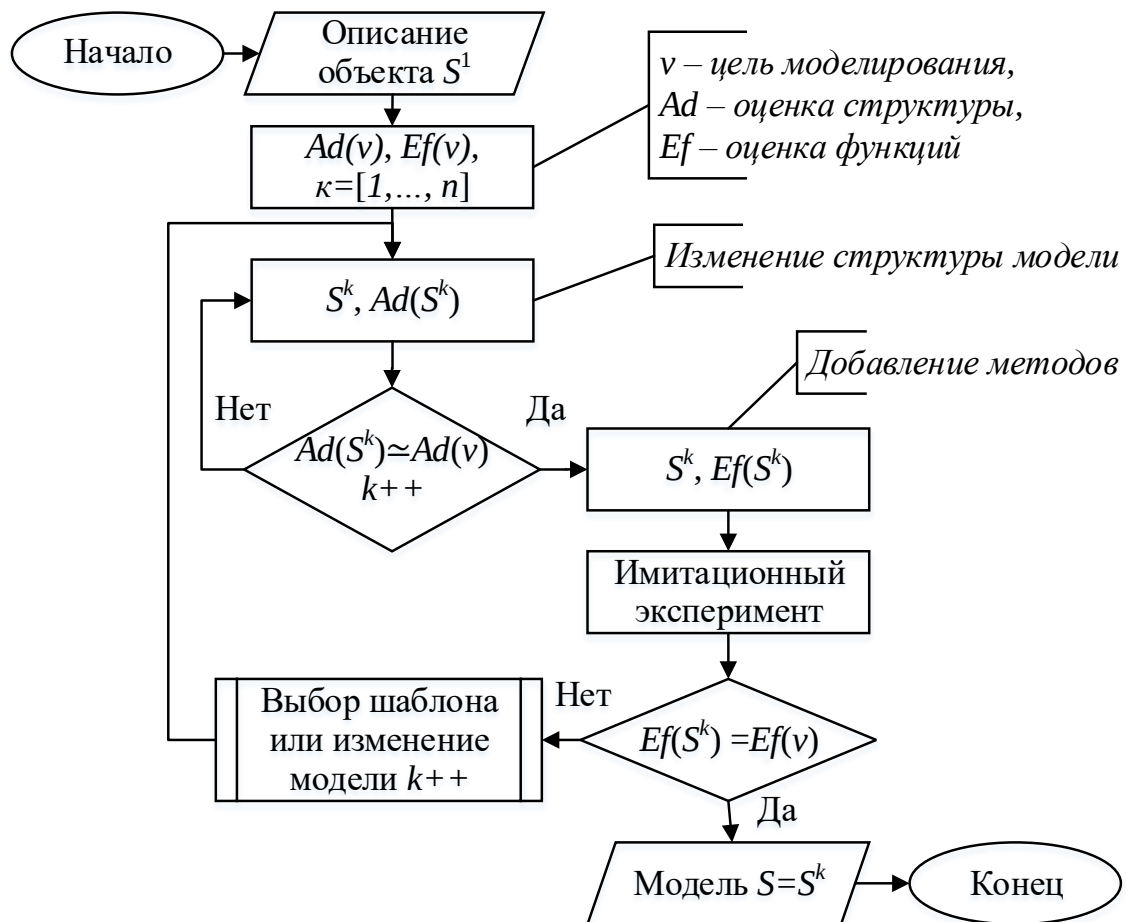


Рисунок 9 – Алгоритм построения модели

Дальнейшее построение модели заключается в создании методов функционирования, отражающих работу исходной системы. Выполняется формирование базы знаний, описывающей логику поведения структурных элементов модели, и определяются особенности функционирования всей системы в целом. Следующий

шаг алгоритма предполагает проведение имитационного эксперимента, заключающегося в выполнении моделирования, изменении параметров функционирования модели, задании внештатных ситуаций и пр. Полученные при этом данные используются для корректировки модели. На основе протоколов имитационного моделирования производится расчёт или экспертная оценка модели. По результатам исследования принимается решение о необходимости корректировки модели.

Интерпретация результатов. Метод обеспечивает построение модели, приближенной к системе-оригиналу, обеспечивает простоту её структуры и наглядность моделирования с заданной степенью детализации. Результат применения эвристического метода определяется целью моделирования и выбором способов оценки моделей. Для расчёта показателей, отражающих структуру модели предлагается рассматривать степень её наглядности, заданную линейной функцией: $Ad(S) = a \cdot N_a + b \cdot N_b + c \cdot N_c$, где коэффициенты $a, b, c \leq 1$, $N_a = |B|$ – количество блоков модели S , $N_b = |I|$ – количество интерфейсов, $N_c = |C|$ – количество соединений.

Предлагается строить следующие эвристические показатели:

1. *Функциональная нагрузка* – наличие правил для всех элементов модели:
 $\forall (B_i \in B) |R^i| \neq 0$, R^i – множество правил функционирования B_i ;
2. *Управляемость* – возможность передавать данные по всем интерфейсам:
 $\forall I_n^i |Pr(A, I_n^i) \cup Pr(Z, I_n^i)| \neq 0$.
3. *Связность* – возможность передавать данные по коммутационным соединениям: $\forall C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle |Pr(A, I_m^j)| \neq 0$ и $|Pr(Z, I_n^i)| \neq 0$.
4. *Наличие альтернативных путей передачи данных*: $|L(I_n^i, I_m^j)|$ где I_n^i – интерфейс B_i , I_m^j – интерфейс B_j .
5. *Максимальная длина пути передачи данных*: $\max |L(I_n^i, I_m^j)|$, где I_n^i, I_m^j – интерфейсы B_i и B_j соответственно.

Примерами качественных показателей, определяемых экспертами на основе проводимых имитационных экспериментов, являются: *пропускная способность* – количество выполняемых действий в единицу времени; *время реакции* – оценка времени прохождения команд, телеметрии; *задержки передачи* – максимальное и

минимальное время задержки передачи данных; *целостность* – оценка взаимодействия элементов модели в виде единой системы; *потери данных* – оценка потерь данных при взаимодействии; *отказоустойчивость* – оценка ошибок модели при имитации нештатных ситуаций; *надёжность* – оценка надёжности структуры (допустимые границы).

Сложность метода. Метод является полным и всегда находит решение. В общем случае задача сводится к полному перебору вариантов преобразований модели. Эвристики позволяют существенно сократить сложность метода. При построении структуры модели простые ограничения на типы блоков и коммутационных соединений сокращают число вариантов в p раз, где $p = |Rt(I)| \cdot |Tp(I)|$. Сложность построения базы знаний определяется сложностью используемых эвристик и составляет $C = O(h^*)$ (следует из построения A^*). Применение шаблонов снижает сложность метода до величины, определяемой числом переменных в модели $O(|P|)$.

2.5. Метод интеграции баз знаний и виртуальных инструментов в гетерогенной модели

Назначение метода. Метод обеспечивает формальные принципы интеграции гетерогенных реализаций моделей для построения цифровых двойников технических систем. Рассматриваются реализации: базы знаний и виртуальных инструментов, представляющих собой программно-математические модели функционирования бортовых систем [75].

Область применения. Применяется для моделей, построенных в системе технического моделирования.

Ограничения. Метод выполняет интеграцию по параметрам, типы данных виртуальных инструментов ограничены структурами D заданными в интеллектуальной имитационной модели.

Описание метода. Предлагается выполнить интеграцию базу знаний с виртуальными инструментами. Базы знаний позволяют моделировать логику функционирования бортовых систем, а виртуальные инструменты - характеристики

устройств или среды передачи данных. Для интеграции выполняется следующий порядок действий:

1. В структурно-параметрическом описании модели создать элемент B_i , в который будет встраиваться виртуальный инструмент.

2. Создать виртуальный инструмент в виде зависимости входных и выходных параметров. Обозначим полученную зависимость $Y^V = V(X^V)$. Параметры из множеств X^V , Y^V определяются в структурах данных из D . Виртуальный инструмент может иметь сложные алгоритмы вычислений, заданных в виде декомпозиции методов (библиотеки виртуальных инструментов).

3. В B_i задать параметры $P^i = X^i \cup Y^i$ в структурах данных D . Сопоставить X^i из B_i с X^V из виртуального инструмента V , Y^i с множеством Y^V соответственно. Выполнить контроль типов данных.

4. Выполнить проверку $\forall (x \in X^V) \text{ Sel}(P^i, x \in X^i) \neq \emptyset, \forall (y \in Y^V) \text{ Sel}(P^i, y \in Y^i) \neq \emptyset$.

5. Базу знаний B_i дополнить правилами вида $(R^i: A^i \rightarrow Z^i)$ 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.

6. B_i может функционировать автономно или входить в какой-либо режим работы модели. В этом случае структурно-параметрическое описание дополнить интерфейсами I^i и коммутационными соединениями с другими элементами модели в соответствии с семантической интерпретацией элемента B_i .

Сложность метода. Определяется сложностью построения виртуальных инструментов C_V .

Интерпретация результатов. Интеграция баз знаний и виртуальных инструментов обеспечивает построение цифровых двойников и позволяет моделировать логику работы систем и их технические характеристики на основе единого семантического представления структурных элементов бортовой аппаратуры.

2.6. Формирование базы знаний по результатам испытаний бортовых систем космических аппаратов

Назначение метода. Метод предназначен для актуализации цифровых двойников за счёт извлечения знаний из испытательных процедур и включения данных натурных испытаний.

Область применения. Метод использует испытательные процедуры, построенные при анализе работы реального оборудования для расширения возможностей имитационной модели и включения в неё результатов функционирования бортовой аппаратуры, которые были выявлены при испытаниях [287]. Правила базы знаний формируются для каждой выбранной команды, по которой проведены испытания функционирования бортовых систем космических аппаратов.

Ограничения. Метод может быть применим только для данных, при которых объект контроля функционирует корректно.

Описание метода. Алгоритм формирования правил базы знаний на основе испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата показан на рисунке (Рисунок 10).

Пусть выбрана команда $k \in K$, по которой проведены испытания. При формировании методик испытаний для каждой команды задаются параметры передачи и критерии контроля. По этим данным формируются правила для элементов модели: B_1 – имитатор МИ командно-измерительной системы; B_2 – имитатор наземной станции в части передачи команд и анализа телеметрии; B_3 – имитатор бортового комплекса управления (назначение имитаторов в модели описано выше). 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.

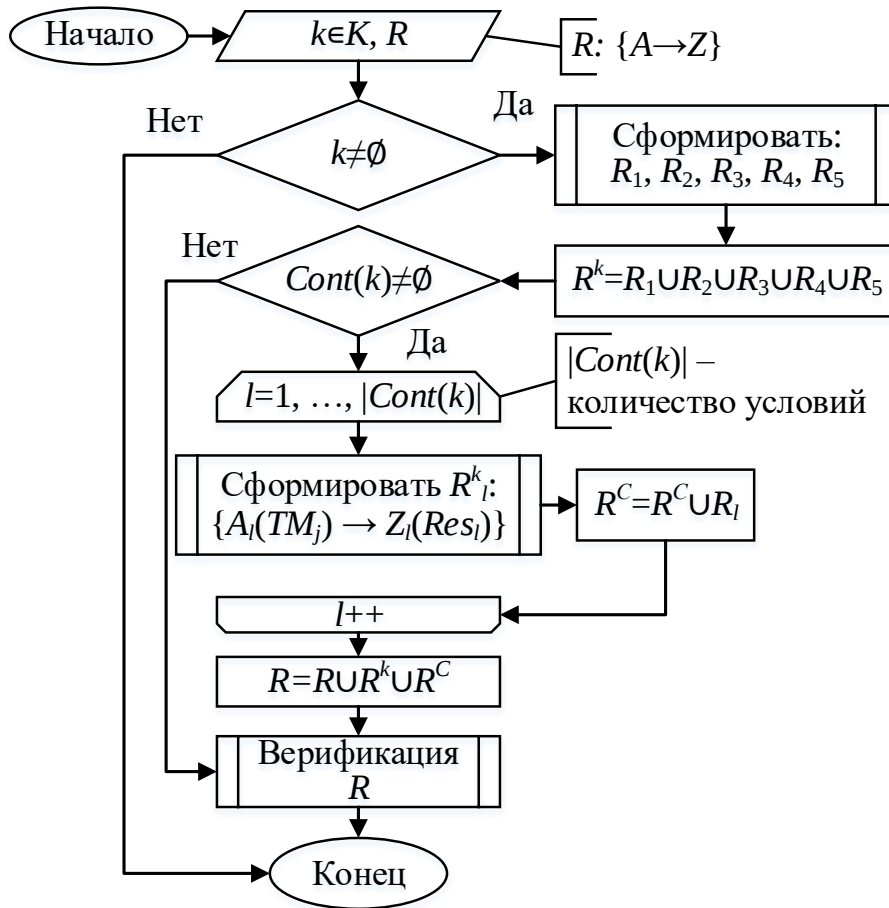


Рисунок 10 – Алгоритм формирования правил на основе испытаний

К множеству правил $R: A(I_n^i, X, K, T) \rightarrow Z(I_m^i, Y, K, T, D(K))$ 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 $A_1 = \langle k \neq \emptyset \rangle$, $Z_1 = \langle \text{«на интерфейс } I_1 \in C_{12}^k \text{ передать } k \text{ и установить } T = \text{«время ожидания»} \rangle$.

$R_2: A_2(I_2) \rightarrow Z_2(k)$, где $A_2 = \langle \text{«на интерфейс } I_2 \in C_{12}^k \text{ поступил массив байт»} \cup \text{«структура массива} = D^k \rangle$, $Z_2 = \langle k = \text{массив байт} \rangle$.

$R_3: A_3(k) \rightarrow Z_3(I_3, k)$, где $A_3 = \langle k = PK_{БКУ} \rangle$, $Z_3 = \langle \text{«на интерфейс } I_3 \in C_{13}^k \text{ передать } k \rangle$.

$R_4: A_4(I_4) \rightarrow Z_4(I_5, k)$, где $A_4 = \langle \text{«на интерфейс } I_4 \in C_{13}^k \text{ поступил массив байт»} \cup \text{«структура массива} = D^k \rangle$, $Z_4 = \langle k = \text{массив байт} \rangle \cup \langle \text{«на интерфейс } I_5 \in C_{41}^r \text{ передать данные } DR_i \rangle$.

$R_5: A_6(I_6) \rightarrow Z_5(TM_j)$, где $A_5 = \langle \text{«на интерфейс } I_6 \in C_{12}^t \text{ поступил массив байт»} \cup \text{«структура массива} = D^t \rangle$, $Z_5 = \langle TM_j = \text{массив байт} \rangle$, $TM_j \in TM$ – телеметрия.

К полученному множеству R^k добавляем правила R_l^k ($l = 1, \dots, |Cont(k)|$, $|Cont(k)|$ – количество условий для контроля отработки команды k . $(R_l^k: A_l(TM_j) \rightarrow Z_l(Res_l))$, где $A_l(TM_j) = \langle \text{параметр } TM_j \text{ по адресу } Adr_l = Res_l \rangle$ $Z_l = \langle \text{контроль } TM_j \rangle$.

Сложность метода линейно зависит от числа критериев анализа отработки команд $Cont(k)$, заданных в испытательных процедурах:

$$C = \sum_{i=1}^K (|Cont(k_i)| + |R^k|).$$

Интерпретация результатов. База знаний, входящая в состав цифрового двойника, дополняется методами приёма и отработки команд, что отражает все особенности функционирования реального оборудования. Форма представления знаний правилами предоставляет удобный механизм объяснения решений. Применение баз знаний обеспечивает анализ процессов, происходящих при исследовании объекта контроля.

2.7. Структурно-графический анализ интеллектуальной модели

Назначение метода. Поиск ошибок в структурно-параметрическом и функциональном описании модели по заданным на основе формальных представлений эвристическим показателям [282, 291], анализ полноты программ испытаний на основе сопоставления с эталонной базой знаний.

Область применения. Метод применяется для имитационных моделей на основе баз знаний продукционного типа.

Ограничения. Метод выполняет анализ модели только по критериям, определяемым специалистом предметной области.

Описание метода. Рассматриваются критерии оценки, такие, как валидация модели, валидация данных, верификация и полнота.

Оценка логической непротиворечивости знаний и структуры модели.

1. База знаний противоречива, если в ней содержатся правила, позволяющие вывести как сам факт Z , так и его отрицание: $\exists (R_1, R_2 \in R) \mid R_1: A_1 \rightarrow Z, R_2: A_1 \rightarrow \neg Z$.

Кроме того, введём дополнительные критерии валидации, обусловленные предметной областью.

2. Для взаимодействия элементов модели, заданных правилами, должны быть определены коммутационные соединения: если $\exists L(I_n^i, I_m^{i+l})$ – путь $B_i, B_{i+1}, \dots, B_{i+l}$, то $\exists C_L = \{C_{pq} = \langle I^p, I^q \rangle, p=i, \dots, i+l-1, q=p+1\}$.

3. Между элементами модели, для которых существуют зависимые цепочки правил, должны быть заданы коммутационные соединения: Если Rch^i, Rch^j таковы, что $Dep(Rch^i, Rch^j)$, то $\exists (R_1: A_1 \rightarrow Z_1, R_2: A_2 \rightarrow Z_2) \mid R_1 \in Rch^i, R_2 \in Rch^j$ и $\exists (C_{ij} = \langle I_1^i, I_2^j \rangle) \mid I_1^i \in Pr(Z_1, I), I_2^j \in Pr(A_2, I)$.

4. Для каждой команды k в правилах должен быть задан единственный объект управления: $\forall (k \in K)$ если $\exists R_1, R_2 \in R^1$ (подмножество правил для B_1) $\mid R_1: A_1 \rightarrow Z_1, R_1 \in Sel(R, K=k), R_2: A_2 \rightarrow Z_2, R_2 \in Sel(R, K=k)$ и $Pr(Z_1, I) = I_n^1, Pr(Z_2, I) = I_m^1$ и $C_1 = \langle I_n^1, I_1^1 \rangle, C_2 = \langle I_m^1, I_2^1 \rangle$, то $i=j$ (B_i, B_j – элементы модели).

5. Для каждой команды k существует единственный алгоритм её выполнения элементом модели B_i : $\forall (k \in K) \forall (R_k \in Sel(R^i, K=k)) \exists! (Rch_k^i) \mid R_k \in Rch_k^i$, где R^i – подмножество правил для B_i , Rch_k^i – цепочка правил отработки команды.

6. Для каждой команды k существует единственная цепочка её выполнения в рамках всей модели: $\forall k \in K$ если $\exists (Rch_k^i, Rch_k^j)$ такие что $Dep(Rch_k^i, Rch_k^j)$, Rch_k^i, Rch_k^j – цепочки правил отработки команды элементами B_i и B_j , то $\exists! FMod(B_i, B_j) \mid Rch_k^i \subseteq FMod$ и $Rch_k^j \subseteq FMod$.

Валидация данных модели позволяет выполнять анализ реакций элементов модели на изменения входных параметров.

1. Для данных существуют правила их заполнения: если $Y^i = V^i(X^i) \neq \emptyset$, то $Pr(R^i, X^i) \neq \emptyset$.

2. Для данных существуют правила их интерпретации: если $Y^i = V^i(X^i) \neq \emptyset$, то $Pr(R^i, Y^i) \neq \emptyset$.

3. Для каждого таймера существуют правила: $\forall (t \in T)$ если $Sel(A^i, T=t) \neq \emptyset$ и/или $Sel(Z^i, T=t) \neq \emptyset$.

4. Для каждой команды k существует элемент модели, выполняющий её передачу: $\forall (k \in K) \exists (B_i, R_1: A_1 \rightarrow Z_1, R_1 \in Sel(R^i, K = k)) \mid k \in Pr(Z_1, K)$.

5. Для каждой команды k существует элемент модели, выполняющий её получение: $\forall (k \in K) \exists (B_j \text{ и } R_2: A_2 \rightarrow Z_2, R_2 \in Sel(R^j, K = k)) \mid k \in Pr(A_2, K)$.

Верификация предполагает проверку на соответствие структуры и методов работы модели по следующим критериям:

1. Для коммутационного интерфейса допустимо единственное соединение: $\forall I_n^i \exists! I_m^j \mid C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle \in C$.

2. Коммутационное соединение допустимо только по однотипным интерфейсам: $\forall (C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle) Tr(I_n^i) = Tr(I_m^j)$.

3. Коммутационное соединение выполняется для разнонаправленных интерфейсов: $\forall (C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle) Rt(I_n^i) \neq Rt(I_m^j)$

4. Направление передачи данных от I_n^i к I_m^j задаётся правилами базы знаний: $\forall (C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle) Sel(Z^i, I = I_n^i) \neq \emptyset$ и $Sel(A^j, I = I_m^j) \neq \emptyset$.

Полнота включает проверку всех возможных вариантов функционирования бортовой аппаратуры путём исследования методов работы модели:

1. Для всех элементов модели должны быть заданы методы функционирования: $\forall (B_i) V^i \cup R^i \neq \emptyset$.

2. Каждое правило базы знаний должно входить в один из режимов функционирования модели: $\forall (R_j^i \in R^i) \exists (FMod \subseteq R) \mid Sel(FMod, R = R_j^i) \neq \emptyset$.

3. Для всех интерфейсов должны быть заданы правила приема или передачи данных: $\forall (I_n^i \in I) Sel(R^i, I = I_n^i) \neq \emptyset$.

4. Не допускается наличие несвязанных коммутационных интерфейсов: $\forall (I_n^i \in I) \exists (C_{nm}^{ij} \in C) \mid C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle$.

5. Если между элементами модели заданы коммутационные соединения, то существует путь передачи данных по интерфейсам, входящим в это соединение: $\forall (C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_m^j, \tau \rangle) \exists L(I_n^i, I_m^j)$.

6. Обеспечение равномерной функциональной нагрузки для элементов модели: $\forall (B_i \in B) |R^i| \leq \frac{\sum_{j=1}^{|B|} |R^j|}{|B|} + \delta_B$, где δ_B – коэффициент допустимого превышения функциональной нагрузки элементов.

7. Обеспечение равномерной функциональной нагрузки для интерфейсов модели: $\forall (I_n \in I) |Sel(R, I=I_n)| \leq \frac{\sum_{p=1}^{|I|} |Sel(R, I=I_p)|}{|I|} + \delta_I$, где δ_I – коэффициент допустимого превышения функциональной нагрузки интерфейсов.

Анализ базы знаний, построенной по программе испытаний. Обозначим базу знаний, построенную по программе испытаний – R_N и эталонную базу знаний, с которой будет выполняться сравнение, построенную специалистом предметной области – R_E . Алгоритм анализа:

1. Определить команды, моделирование которых выполняется в построенной базе знаний $K_N = Pr(R_N, K)$ и эталонной – $K_E = Pr(R_E, K)$.

2. Выделить правила, в которых заданы методы отработки команд $R_N \Leftarrow Sel(R_N, k \in K_N)$, $R_E \Leftarrow Sel(R_E, k \in K_E)$.

3. Построить цепочки правил $Rch_N^i \subseteq R_N'$ и $Rch_E^i \subseteq R_E'$, выполняемые в процессе логического вывода для каждого элемента модели B_i .

4. Найти зависимые цепочки правил, то есть для каждой цепочки $Rch_N^i \subseteq R_N'$ найти цепочки $Rch_N^j \subseteq R_N$, для которых выполняется $Dep(Rch_N^i, Rch_N^j)$ и $Rch_E^j \subseteq R_E$ для которой $Dep(Rch_E^i, Rch_E^j)$.

5. Выполнить объединение зависимых цепочек правил по построенной и эталонной базам правил для всех элементов модели $B_1, \dots, B_p$, то есть множество $FMod_N(B_1, \dots, B_p) = Rch_N^1 \cup Rch_N^2 \cup \dots \cup Rch_N^p$, такие что выполняется $Dep(Rch_N^i, Rch_N^j)$, $i, j, p \in [1, |B|]$ и аналогичным образом $FMod_E(B_1, \dots, B_p)$.

6. Построить пути передачи данных $L_N(B_i, B_j)$ и $L_E(B_i, B_j)$ для всех $FMod_N(B_i, B_j) \neq \emptyset$ и $FMod_E(B_i, B_j) \neq \emptyset$ соответственно.

7. Сопоставить $L_N(B_i, B_j)$ и $L_E(B_i, B_j)$, результатом будет являться список ошибок построенной базы знаний.

Сложность метода определяется сложностью вычисления заданных в методе критериев и объёмом базы знаний. Обозначим множество критериев $Crit$, сложность вычисления критерия $C(Crit)$:

$$C = \sum_{i=1}^{|Crit|} C(Crit_i) \times |R|.$$

Интерпретация результатов. Метод показывает зависимости элементов модели, ошибки базы знаний, недостающие или избыточные данные и структуры, для которых не заданы правила в базе знаний, обеспечивая контроль полноты функционального представления. При обнаружении ошибок модель должна быть доработана. Интерпретация отдельных показателей приведена в их описании. Метод позволяет выполнять анализ полноты методик испытаний, сопоставляя базу знаний, построенную из испытательных процедур, с эталонной базой знаний либо сопоставляя фрагменты базы знаний для однотипных устройств основного и резервного комплектов оборудования.

2.8. Анализ надёжности конфигурации бортовых систем

Интеллектуальная имитационная модель описывает конфигурацию бортовых систем космического аппарата. Требуется для заданного набора устройств с известными вероятностями безотказной работы выполнить оценку надёжности или вероятности безотказной работы построенной конфигурации. Для вычислений применяется ГОСТ Р 51901.14-2007 (МЭК 61087:2006) «Менеджмент риска. Структурная схема надёжности и булевы методы».

Модель содержит статистически независимые блоки, для которых могут быть построены структурные схемы надёжности, представляющие собой комбинации последовательных и параллельных схем с нагруженным или ненагруженным резервом (Рисунок 11)

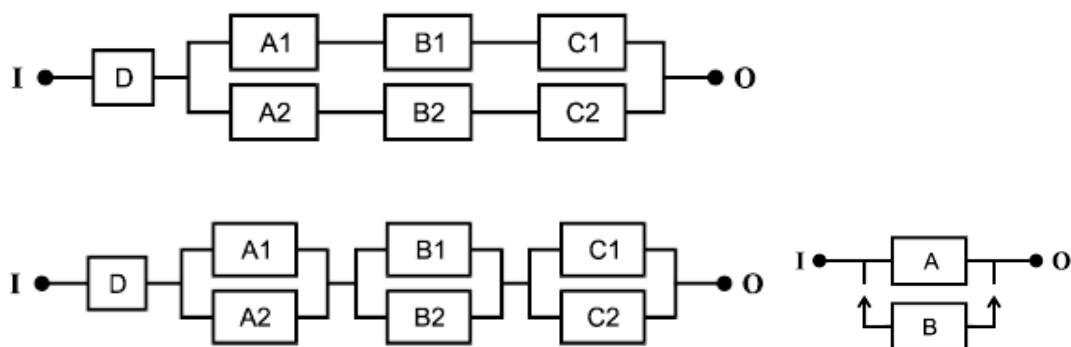


Рисунок 11 – Примеры структурных схем надёжности

Предлагается алгоритм расчёта вероятности безотказной работы для структурной схемы соединения оборудования с учётом резервирования (Рисунок 12).

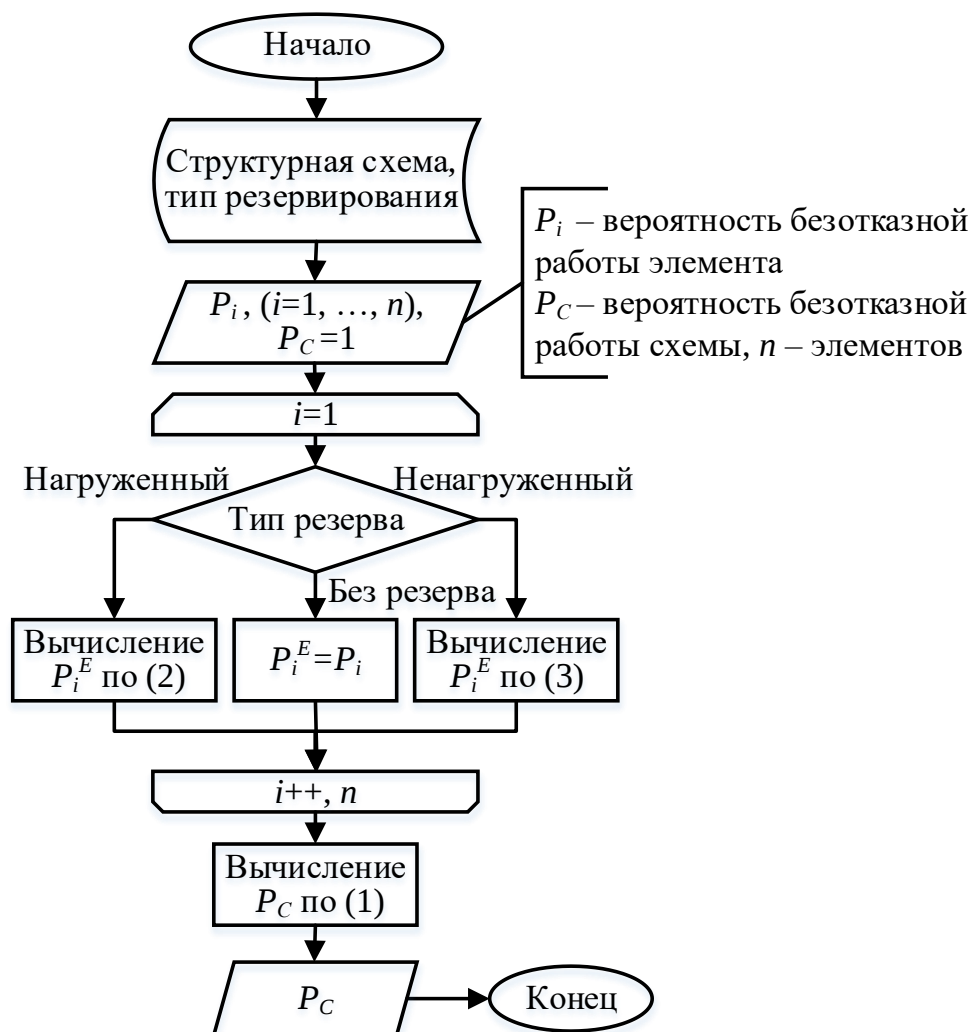


Рисунок 12 – Алгоритм расчёта вероятности безотказной работы

Вероятность безотказной работы технической системы за время t определяется формулой:

$$P_C = P_1^E \times P_2^E \dots P_n^E = \prod_{i=1}^n P_i^E \quad (1)$$

где P_i^E – вероятность безотказной работы i -го элемента системы за время t . Вероятность безотказной работы каждого элемента зависит от количества резервов и типа резервирования. Положим, что все резервы имеют одинаковую вероятность безотказной работы, соответствующую типу оборудования.

Вероятность P_i^E элемента i , имеющего k резервов ($k+1$ объект) с нагруженной схемой резервирования и вероятностью P_i для рассматриваемого типа оборудования может быть рассчитана как:

$$P_i^E = 1 - \prod_{i=1}^{k+1} (1 - P_i) \quad (2)$$

При ненагруженном типе резервирования резерв включается только в случае отказа работавшего до этого устройства, вероятность P_i^E элемента, имеющего k резервов определяется по формуле:

$$P_i^E = e^{-\lambda} \left(1 + \lambda + \frac{\lambda^2}{2!} + \dots + \frac{\lambda^k}{k!} \right) \quad (3)$$

где λ – среднее число отказов за исследуемый интервал работы, которое определяется через вероятность безотказной работы: $\lambda = -\ln(P_i)$.

Для расчёта вероятности безотказной работы на первом этапе вычисляются вероятности P_i^E для каждого элемента по формулам (2) или (3) в зависимости от типа резервирования. Затем по формуле (1) вычисляется P_C – вероятность для всей системы, заданной структурной схемой.

2.9. Анализ модели на основе результатов испытаний бортовых систем космических аппаратов

Назначение метода. Анализ имитационной модели путём сравнения результатов испытаний бортовой аппаратуры и результатов имитационных экспериментов, выполненных на моделях проектируемого оборудования.

Область применения. Метод предназначен для исследования моделей, являющихся прототипами готовых систем.

Ограничения. Метод может быть применим только тогда, когда существует изготовленное и испытанное оборудование.

Описание метода. Пусть выполняется испытание приёма-передачи команд $k \in K$, N_k – число команд. Программа испытаний для каждой команды $k \in K$ содержит набор параметров, которые определяют поведение имитаторов и множество критериев контроля телеметрии $Cont(k) = \{(Adr, Res)\}$, где Adr – адрес параметра в телеметрическом кадре, Res – его значение. Для каждой команды задаются собственные критерии. Обозначим $|Cont(k)|$ – число критериев контроля для команды k . Множество $Cont(k)$ содержит критерии контроля квитанции на команду и критерии анализа отработки команды. В случае успешного проведения испытаний построенные критерии $Cont(k)$ являются эталонными значениями для анализа функционирования модели. Алгоритм анализа имитационной модели на основе испытаний приведён на рисунке (Рисунок 13).

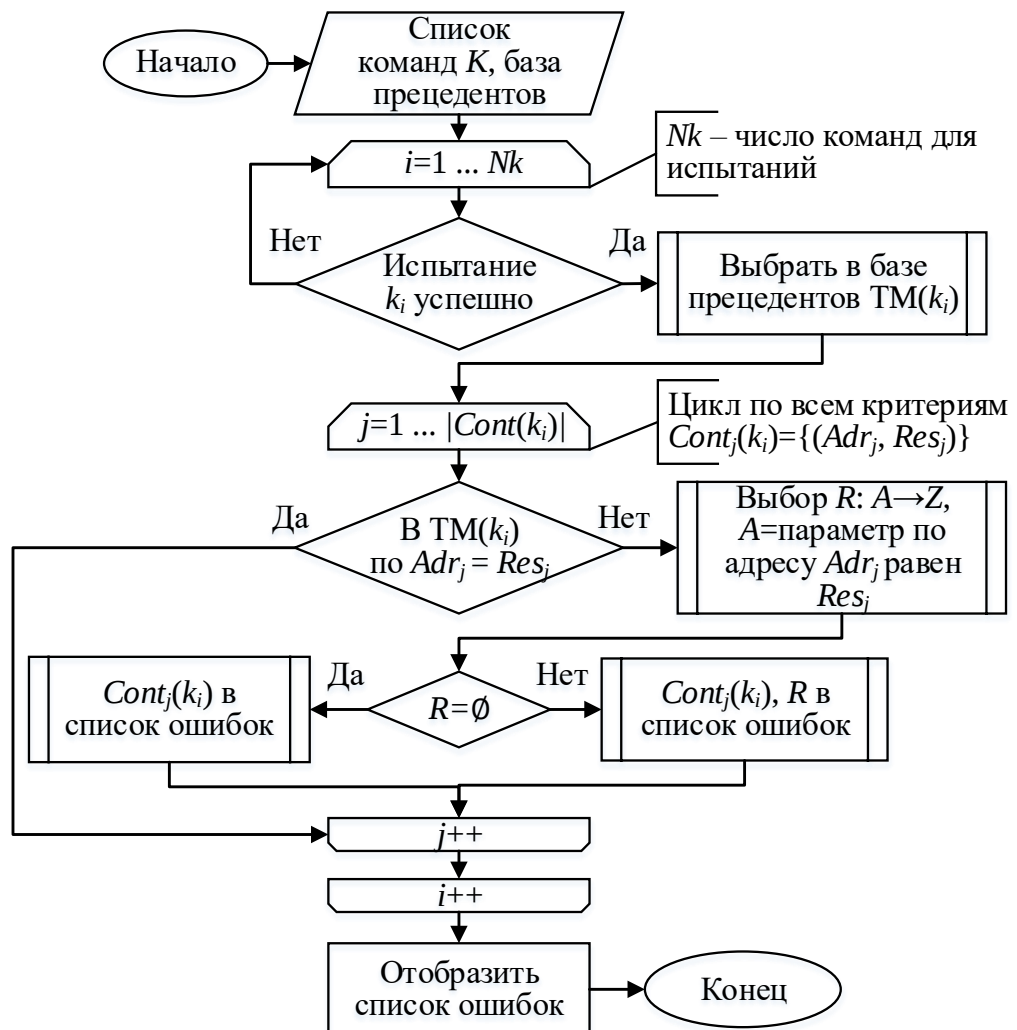


Рисунок 13 – Алгоритм анализа модели по результатам испытаний

Выбираются команды k_i , для которых сформированы испытательные процедуры. Для каждой такой команды выполняется поиск прецедентов функционирования имитационной модели. Прецедент содержит телеметрическую информацию $TM(k_i)$, параметры и правила, которые были выполнены для отработки команды. В телеметрическом кадре выбираются значения с адресом Adr_j и выполняется их сравнение с Res_j (критериями контроля из методики испытаний).

Сложность метода определяется общим числом правил, заданных в базе знаний для отработки команд и условий из программы испытаний:

$$C = \sum_{i=1}^{Nk} |Cont(k_i)| \sum_{j=1}^{|Cont(k_i)|} |Cont_j(k_i)| + |Sel(R, k_i)|.$$

Интерпретация результатов. Для интерпретации результатов применяются следующие правила:

1. Если значения параметров телеметрии объекта контроля и модели не совпадают, то формируется список ошибок. Выбирается правило R , в левой части которого (в условии) указан параметр Adr_j . Найденное правило R и условие $Cont(k_i)$ добавляются в список ошибок. Полученный результат свидетельствует о том, что в базе знаний правило R задано некорректно и требуется его изменение или удаление.

2. Если значения параметров отработки команд телеметрии прецедентов имитационной модели и объекта контроля совпадают, то выполняется переход к анализу следующей команды.

3. Если в имитационной модели отсутствуют прецеденты для выбранной команды, то в список ошибок входит $Cont(k_i)$ из методики испытаний.

При отсутствии в базе знаний правил отработки команды либо несовпадении результатов моделирования и данных, полученных от объекта контроля, требуется доработка имитационной модели путём формирования новых правил базы знаний на основе испытательных процедур.

2.10. Выводы к главе 2

Выполнена формализация понятия интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовой системы, которая представляет формальный подход к созданию цифровых двойников. Модель обладает гетерогенной архитектурой и объединяет базы знаний и виртуальные инструменты для моделирования логики работы систем и их технических характеристик на основе единого семантического представления структурных элементов бортовой аппаратуры.

Формальное теоретико-множественное представление модели содержит структурно-параметрическое описание элементов бортовой аппаратуры и функциональное – методы имитации функционирования систем. Выделены компоненты унификации, определяющие семантический слой модели для объединения различных реализаций методов имитации в единое комплексное решение. Показаны свойства элементов модели и определены основные операции над ними. Выполнена семантическая интерпретация формального представления модели в терминах предметной области.

Разработаны методы, которые упрощают создание базовых элементов цифровых двойников, позволяя автоматизировать построение и анализ моделей и их применение для проектирования, разработки и испытаний бортовых систем.

Предложен новый метод построения интеллектуальных имитационных моделей на основе эвристического поиска. Метод позволил использовать дерево допустимых состояний и шаблоны моделей для поддержки специалиста предметной области в выборе преобразований моделей и управления процессом их построения.

Предложен метод формирования базы знаний на основе программы испытаний бортовых систем, обеспечивающий актуализацию цифровых двойников за счёт извлечения знаний из испытательных процедур и включения данных натурных испытаний. Метод использует испытательные процедуры, построенные при анализе работы реального оборудования для расширения возможностей имитационной модели и включения в неё результатов и критериев контроля функционирования бортовой аппаратуры, которые были определены при испытаниях.

Предложены формальные принципы интеграции гетерогенных реализаций моделей для построения цифровых двойников на основе семантического представления бортовых систем космических аппаратов.

Предложены новые методы анализа интеллектуальных имитационных моделей. 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 бортовых систем выполняет сравнение результатов испытаний бортовой аппаратуры и результатов имитационных экспериментов, проводимых на интеллектуальных имитационных моделях и делать выводы о соответствии логики работы модели и исследуемого устройства.

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.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

3.1. Моделирование бортовых систем на основе логического вывода в базах знаний интеллектуальной имитационно модели

Назначение метода - имитация функционирования бортовых систем для решения задач, возникающих в деятельности конструктора бортовой аппаратуры и поддержки формирования и анализа проектных решений.

Область применения. Метод применяется для моделирования логического уровня работы бортовых систем.

Ограничения. Применимость метода ограничена набором знаний, который был заложен при построении модели. Метод не предназначен для имитации систем реального времени.

Описание метода. Обозначим состояния модели S в моменты времени моделирования $t_0, t_1, \dots, t_{st}$ как $S^0, S^1, \dots, S^{st}$, где st – число шагов моделирования. Состояние модели представляется как совокупность значений переменных, таймеров и параметров времени передачи данных.

Для определения масштаба времени моделирования и выбора очередного шага предложены параметры: период дискретизации Δt и коэффициент замедления Dec , который определяет скорость выполнения действий в модели. Время при моделировании изменяется, начиная с t_0 через равные промежутки Δt , то есть $t_i = t_{i-1} + \Delta t$. Реальное время работы модели увеличивается кратно коэффициенту замедления $t'_i = t'_{i-1} + \Delta t * Dec$.

Алгоритм интеллектуального имитационного моделирования показан на рисунке (Рисунок 14).

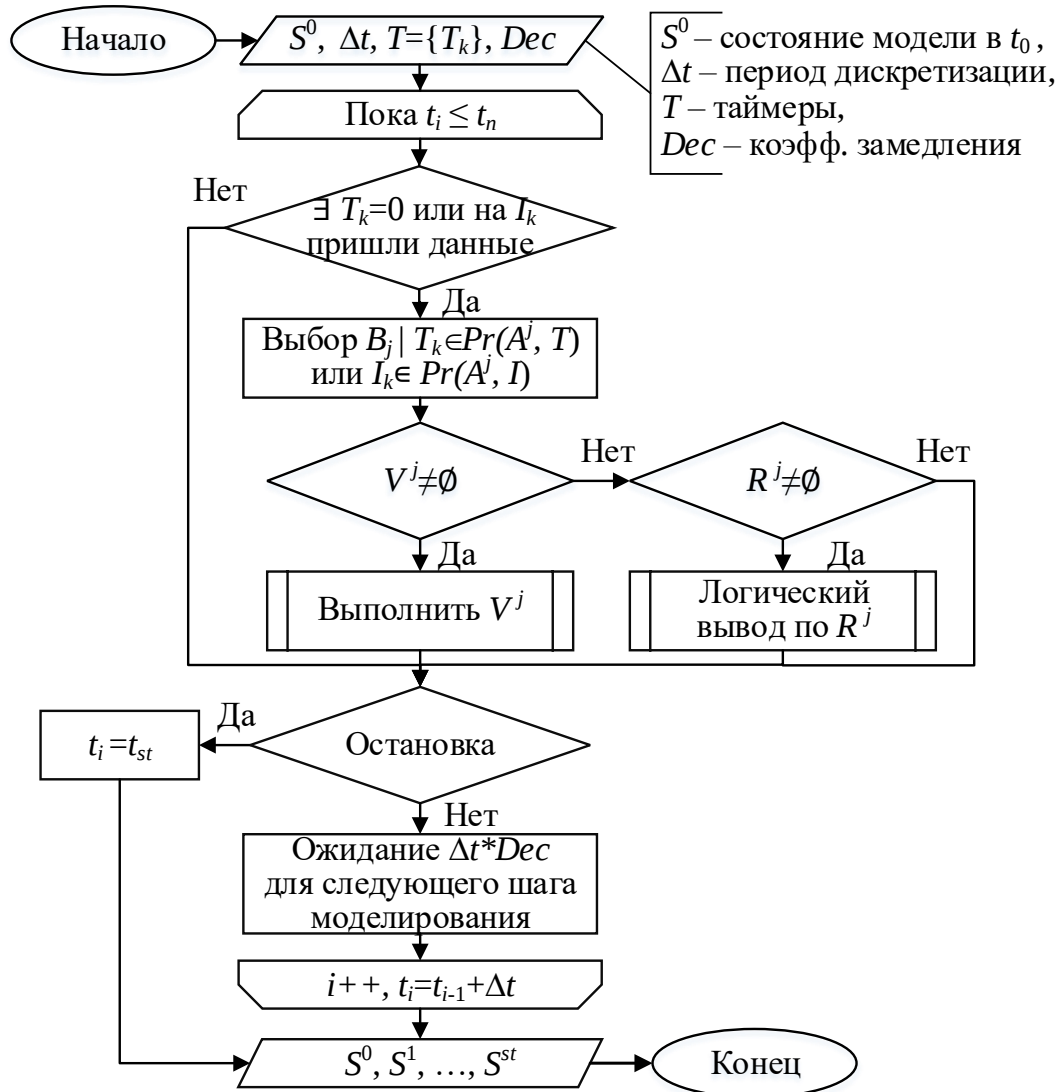


Рисунок 14 – Алгоритм имитационного моделирования

Моделирование начинается с состояния S^0 в начальный момент времени t_0 . Метод моделирования позволяет изменять состояние имитационной модели в соответствии с правилами, заложенными в базе знаний или методами, реализованными в виде виртуальных приборов. На каждом шаге происходит анализ текущего состояния модели, и при возникновении события, вызывающего изменение состояния модели, выполняется моделирование и переход к следующему шагу. В качестве событий, вызывающих изменение состояния модели, рассматривается наступление времени, указанного в таймере, или поступление данных на любой интерфейс элемента модели. Множество элементов управления временем T предназначено для задания точек перехода между событиями модели.

Способы реализации таймеров определяются в каждой модели в зависимости от её назначения. В моделях, реализованных в виде правил, таймеры задают время начала выполнения правила, длительность ожидания, время его повторения или окончания. Таймеры, как и другие виды переменных, участвуют в формировании правил. Для моделей, методы работы которых заданы в библиотеке виртуальных приборов, таймеры предназначены для имитации задержек преобразования или передачи данных. Если при достижении модельного времени не происходит планового окончания выполнения отдельного метода, то время моделирования останавливается до его завершения.

Выбирается элемент модели $B_j \in B$, для которого произошло изменение состояния S_i , то есть сработал таймер T_k или на интерфейс I_k пришли данные. Если методы работы элемента модели B_j заданы в виде программ, встроенных в библиотеку инструментов $V^j \neq \emptyset$, то выполняется соответствующая программа, которая изменяет состояния модели. Если методы работы модели описана в базе знаний, то есть $R^j \neq \emptyset$, то выполняется процедура логического вывода для элемента модели B_j . Алгоритм логического вывода показан на (Рисунок 15).

Логический вывод начинается с выбора правил из базы знаний элемента модели B_j , применимых к текущему состоянию модели S^i . Обозначим множество правил B_j как R^j . Для каждого правила $R_l \in R^j$ ($l=1, \dots, |R^j|$) выполним сопоставление антецедента A_l правила с набором переменных, описывающих текущее состояние модели S^i . Если найдено такое правило R_l , для которого все условия левой части соответствуют текущему состоянию модели, то правило применяется. Его выполнение изменяет состояние модели, что обозначим как $S^{i+1} = S^i \cup Z_l$, где Z_l консеквент правила.



Рисунок 15 – Алгоритм логического вывода

При выполнении правил могут активизироваться таймеры, передаваться или изменяться данные. Выполненное правило удаляется из рассмотрения, что обозначим как $R^j \setminus R_l$. Если при очередном просмотре правил в базе знаний не остаётся правил, применимых к текущему состоянию модели, то логический вывод завершается.

Сложность метода зависит от количества шагов моделирования st , количества правил, применимых на каждом шаге $|Rch^i|$ и сложности выполнения отдельного правила $C(r)$:

$$C_{sim} = st \times \sum_{i=1}^{|B|} \sum_{j=1}^{|Rch^i|} C(r_j \in Rch^i).$$

Интерпретация результатов. Метод интеллектуального имитационного моделирования выполняет изменение состояния модели в соответствии со знаниями, заложенными специалистом предметной области. Он отражает функционирование бортовой аппаратуры, заложенное в технической документации. Действия,

выполняемые в процессе логического вывода, запускают выполнение метода в связанных интерфейсами элементах модели. Если в результате логического вывода выполнения правил осуществлена передача данных на исходящий интерфейс, который связан с входящим интерфейсом другого элемента модели, то для него также выполняется алгоритм логического вывода.

3.2. Моделирование командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата

Назначение метода. Моделирование приёма, обработки и пересылки пакетов телекоманд и телеметрии между наземной станцией и бортовыми системами космического аппарата.

Область применения. Применяется для реализации схемы потоков данных, показанной на рисунке (Рисунок 16).

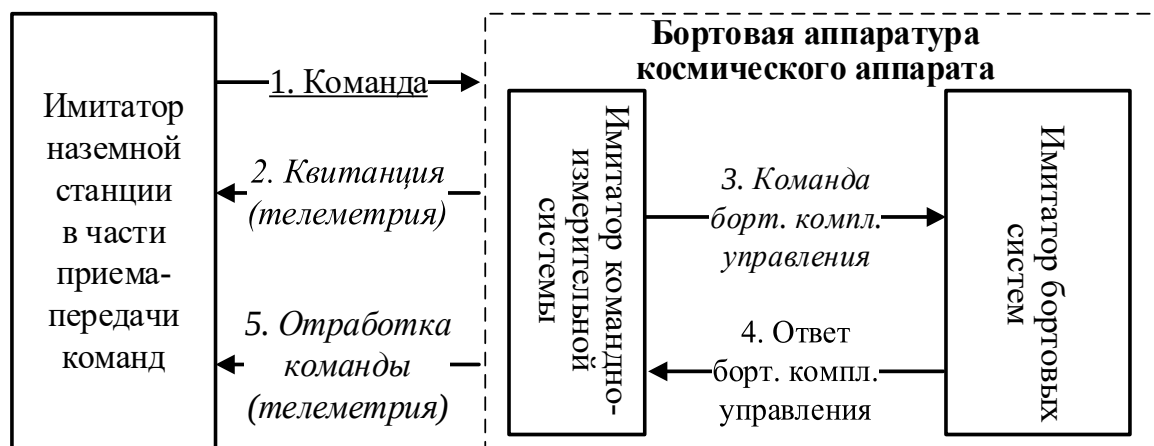


Рисунок 16 – Потоки данных при обработке команд

Имитатор наземного сегмента передаёт команды (стрелка 1), которые получает бортовая аппаратура космического корабля. Команды поступают в командно-измерительную систему, которая после приёма добавляет в телеметрию квитанцию (стрелка 2) и анализирует назначение команд. Если команда предназначена для бортового комплекса управления, то командно-измерительная система передаёт её в имитатор (стрелка 3). Команды, предназначенные для оборудования командно-измерительной системы, она выполняет самостоятельно. Выполнив команду, имитатор бортового комплекса управления формирует ответ и передаёт

его в командно-измерительную систему (стрелка 4). От командно-измерительной системы в наземный сегмент поступают пакеты телеметрии с информацией о состоянии бортовых систем и результатами обработки команд (стрелка 5). При правильном функционировании выполнение каждой команды влияет на состояние бортовых систем и определённым образом отражается в телеметрии. Контроль обработки команд осуществляется в наземном сегменте по её параметрам.

Описание метода. На основе формального представления имитационной модели выделены подмножества элементов модели и разработаны алгоритмы информационного взаимодействия [310]: обработки команд, передачи телеметрической информации и её анализа. Для каждого элемента модели B_j строятся правила $(R_n^j: A_n^j \rightarrow Z_n^j) \mid Pr(A_n^i, K) \neq \emptyset$ или $Pr(Z_n^j, I) \subseteq Pr(C^k \cup C^r \cup C, I)$ в антецеденте которых участвуют команды из K или в консеквенте заданы интерфейсы, предназначенные для передачи команд, квитанций или телеметрической информации. Для выбранных правил строятся цепочки правил Rch^j , зависимые с R_n^j , выполнение которых моделирует работу имитаторов бортовых устройств для осуществления командно-программного управления космическим аппаратом.

Алгоритмы моделирования обработки команд на основе базы знаний приведён на рисунке (Рисунок 17). Метод имитирует информационное взаимодействие имитаторов бортовых систем: B_1 – командно-измерительной системы; B_2 – наземного сегмента; B_3 – бортового комплекса управления, B_4 – бортовой аппаратуры телесигнализации. Для работы метода заданы структуры команд $D^k \subseteq D$, на основе которых создано множество команд $K = K_{КИС} \cup K_{БКУ}$, $K^t \in K_{БКУ}$ – команда на запрос телеметрии. Построена структура данных телеметрии $D^t \subseteq D$. $TM \subseteq D^t$ – множество телеметрических данных, заданных в структурах из; DR – ответы на команды (квитанции).

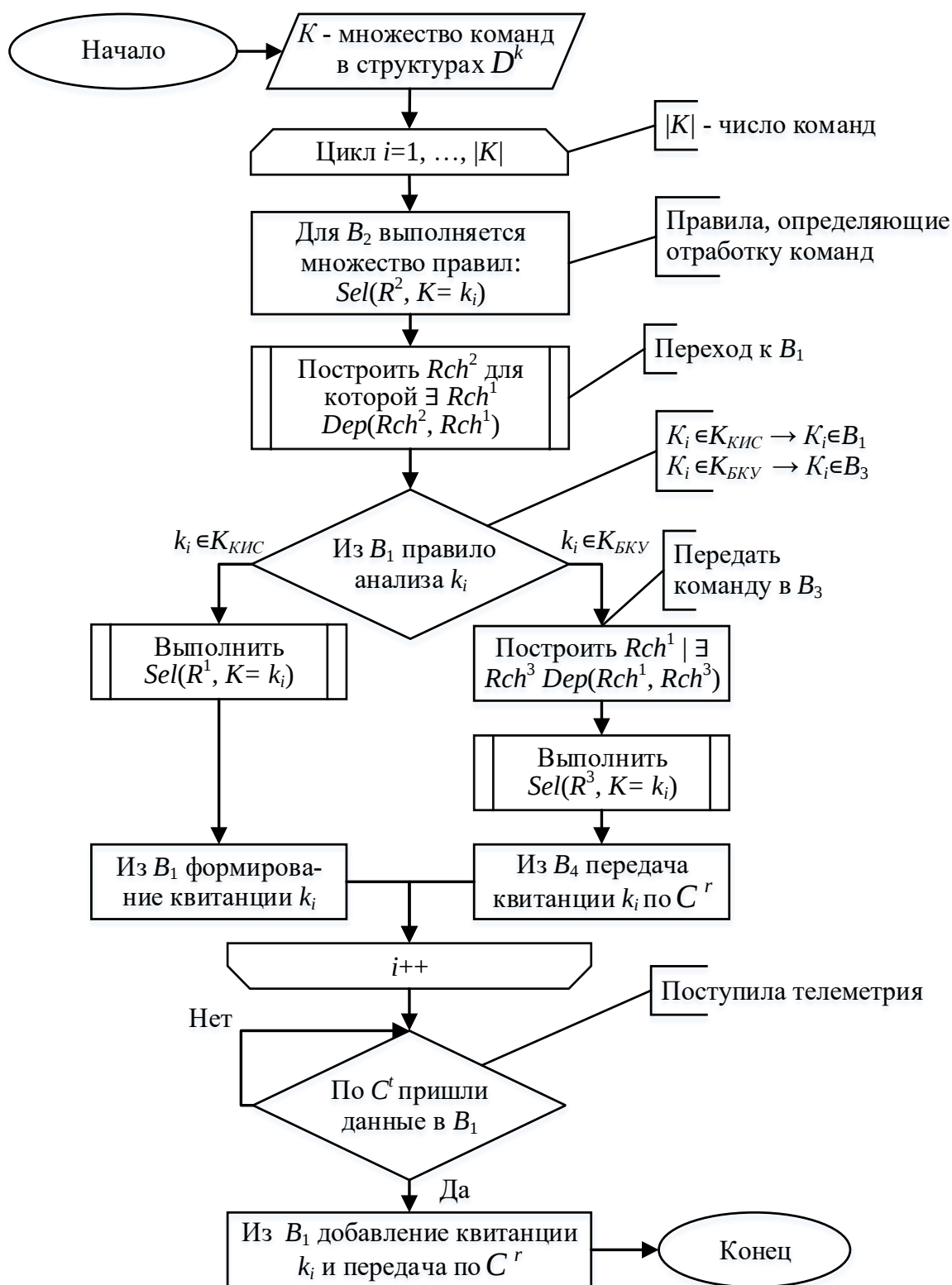


Рисунок 17 – Алгоритм обработки команд

В имитационной модели выбраны подмножества коммутационных соединений, решающие задачи: $C^k \subseteq C$ – передача команд для B_1 ; $C^r \subseteq C$ – передача ответов на команды; $C^t \subseteq C$ – передачи телеметрической информации. Подмножества C^r и C^t позволяют определить множество I^k коммутационных интерфейсов – контроль-

ных точек для анализа прохождения команд. Сформировано подмножество $B' \subseteq B$ элементов модели, участвующих в информационном взаимодействии с объектом контроля B_1 , то есть выбираем $B'_j \in B$ для которых $\exists (C^{1j}_{nm} \in C) \mid C^{1j}_{nm} = \langle I^1_n, I^j_m \rangle$, 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 выполняется 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 на обработку команды. Анализ и контроль отработки команд выполняется по квитанциям и параметрам телеметрической информации, поступающей в B_2 от B_1 . За формирование телеметрического кадра отвечает бортовая аппаратура телесигнализации, в модели представленная имитатором B_4 .

Алгоритм моделирования передачи телеметрической информации показан на рисунке (Рисунок 18).

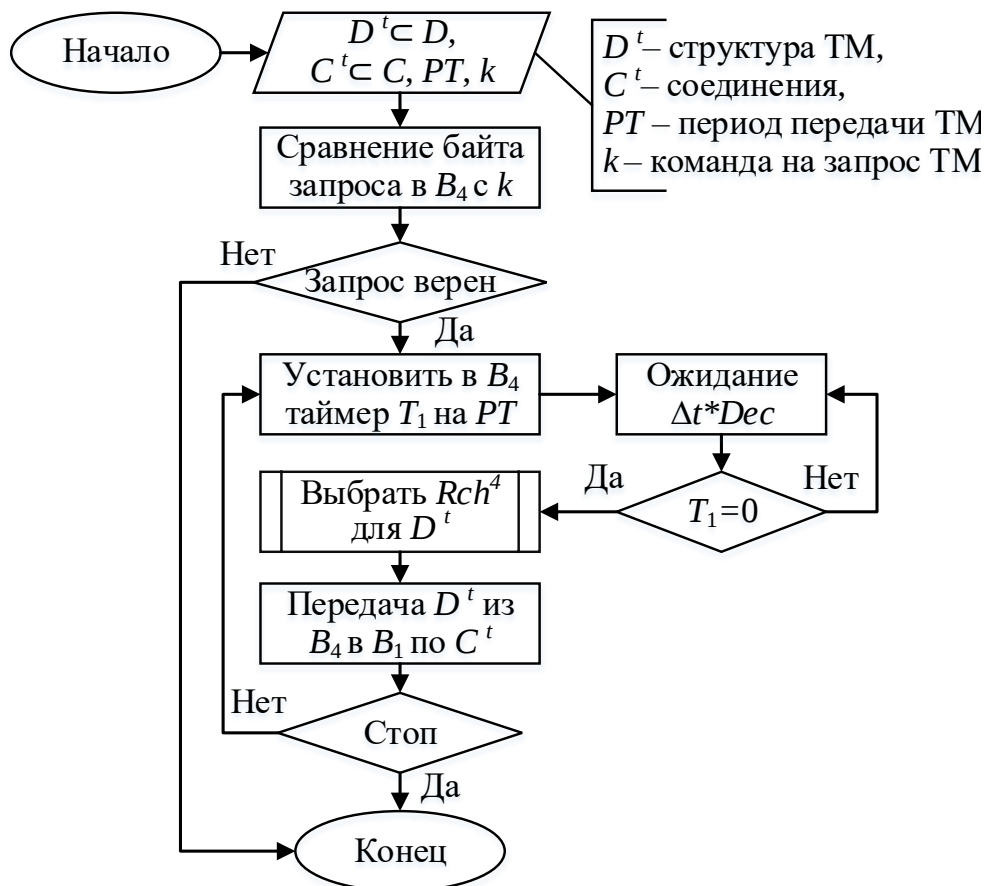


Рисунок 18 – Алгоритм передачи телеметрической информации

Телеметрическая информация в модели передаётся от B_1 в B_2 – имитатор наземной станции. Подготовка телеметрии выполняется непрерывно с заданной периодичностью PT , при этом выполняется контроль совпадения байта запроса с установленным в бортовой аппаратуре телесигнализации значением. При наступлении времени, заданного таймером, выполняется цепочка правил Rch^4 , в которую сходят правила из R^4 , удовлетворяющие условию $Sel(R^4, K = k)$. В результате выполнения правил формируется и заполняется параметрами структура данных телеметрии D^t . Подготовленная телеметрия передаётся в имитатор B_1 . Алгоритм выполняется до тех пор, пока не будет остановлено моделирование.

Алгоритм анализа телеметрической информации, выполняемого имитационной моделью, представлен на рисунке (Рисунок 19).

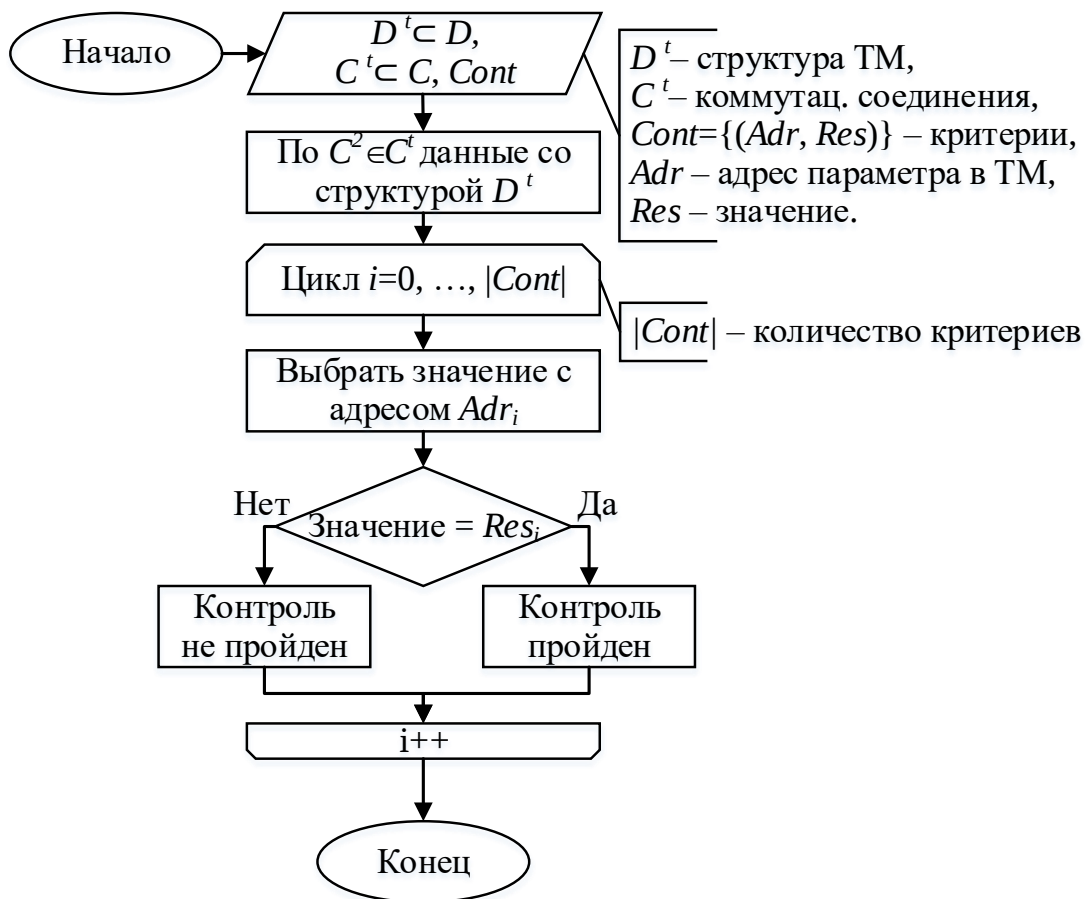


Рисунок 19 – Алгоритм анализа телеметрической информации

Модель выбирает контрольные точки и выполняет анализ прохождения команд управления бортовой аппаратурой. Для анализа выполняется сравнение па-

параметров, заданных в контрольных точках $Controls=\{(Adr, Res)\}$ с данными, поступающими в структуре данных D^t . Для каждого критерия $Controls_l$ ($l=1, \dots, |Controls|$) выполняется поиск значения в телеметрии D^t по адресу, заданному в Adr_l , если найденное значение совпадает с Res_l , то контроль по данному критерию пройден успешно.

Сложность метода определяется количеством моделируемых команд управления $|K|$ и сложностью выполнения правил, входящих в цепочки отработки команд Rch^i :

$$C_{com} = \sum_{i=1}^{|K|} \sum_{r \in Sel(R, k_i)} \sum_{r' \in Rch^i} C(r' \in Rch^i).$$

Интерпретация результатов. Метод моделирования командно-программного управления позволяет рассматривать различные сценарии функционирования бортовых систем, изменять порядок передачи команд, задавать контрольные точки для их анализа, формировать и исследовать телеметрическую информацию. Результаты работы модели соответствуют технической документации. На основе построенной имитационной модели разработан метод испытаний, который использует построенные имитаторы для моделирования взаимодействия сопряжённых устройств с объектом контроля [146, 215].

3.3. Построение прецедентов имитационного моделирования

Назначение метода. Сохранение результатов имитационного моделирования для анализа моделей и результатов испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата. Результатом работы метода являются прецеденты имитационного моделирования.

Под *Прецедентом* понимается последовательность действий, выполняемая для достижения определённого результата и параметры, характеризующие этот результат. Прецедент содержит описание элементов модели, параметры, цепочки правил и телеметрическую информацию.

Область применения. Интеллектуальные имитационные модели с графической структурой и базой знаний.

Ограничения. Метод предназначен для моделей с заданной архитектурой, расширение возможно путём включения дополнительных структур данных.

Описание метода. Метод выполняет имитационное моделирование и выбирает данные, описывающие состояние графических элементов модели и правила базы знаний. Фрагмент структур данных приведён на (Рисунок 20).

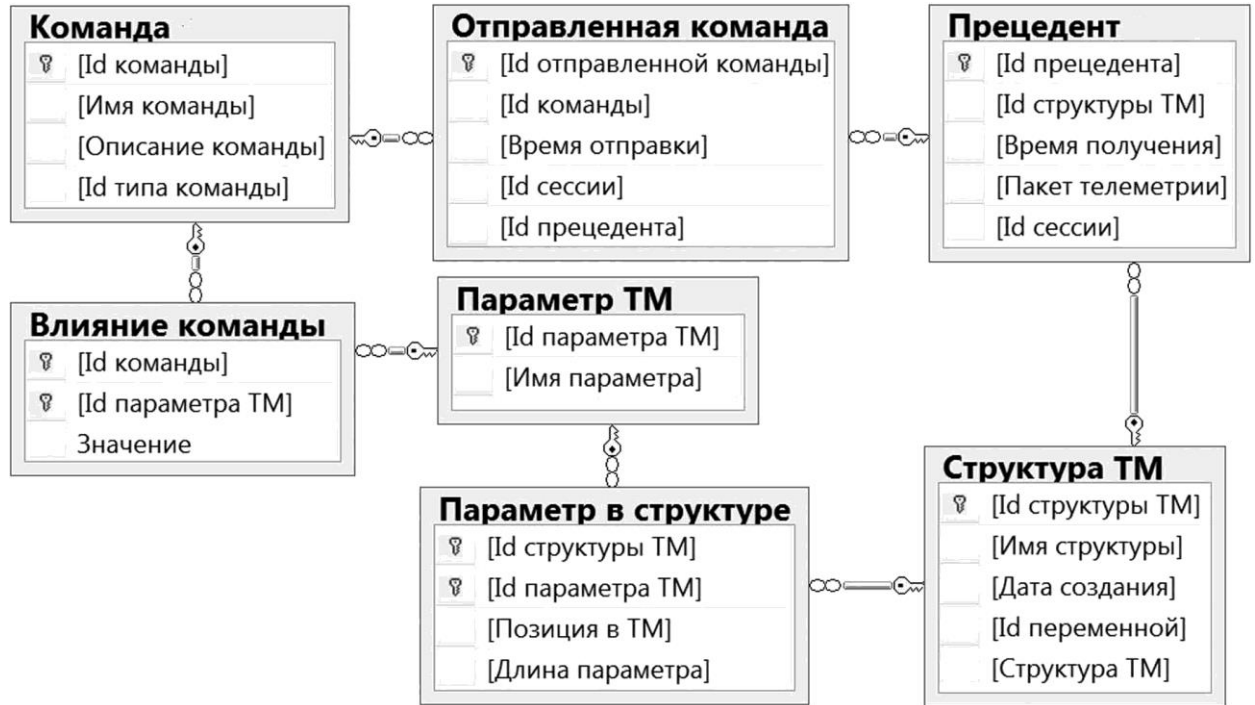


Рисунок 20 – Фрагмент структуры базы данных имитационных моделей

В структуры данных входят таблицы прецедентов, коммутационные интерфейсы, коммутационные соединения, параметры ТМ, выполненные правила, команды и др. Формирование прецедентов происходит для на каждом шаге имитационного моделирования.

Сложность метода зависит от сложности моделирования C_{sim} , количества заполняемых полей базы данных bd и числа проводимых имитационных экспериментов k :

$$C = C_{sim} \times bd \times k.$$

Интерпретация результатов. Результатом применения метода являются прецеденты, отражающие различные режимы функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Построенные прецеденты могут применяться для

структурно-графического анализа интеллектуальных имитационных моделей, построения испытательных процедур и критериев контроля результатов испытаний бортовой аппаратуры.

3.4. Поддержка исследовательских задач

Поддержка высокотехнологичного производства предъявляет повышенные требования к компетенции и знаниям персонала. Представленная технология не рассматривается как часть учебного процесса, однако для повышения качества работы конструкторов бортовой аппаратуры в неё включены отдельные элементы решения исследовательских задач [173].

Структурные элементы новой технологии для решения исследовательских задач состоят из: множества знаний о предмете исследования – $TR = \langle Th, Rs, Q \rangle$, где множество Th – теоретические знания по отдельным видам бортового оборудования и их взаимодействию, Rs – имитационные примеры, Q – контрольно-диагностические материалы; множества сведений о специалистах предметной области – $KN = \langle Inf, Th', Rs', Q' \rangle$, где Inf – квалификационные характеристики (образование, стаж, опыт работы и пр.), $Th' \subseteq Th$ – изученный материал, $Rs' \subseteq Rs$ – примеры, Q' – результаты освоения.

Теоретические знания $Th = (Th(S^0) \cup Th(S) \cup Th(B))$, где $Th(S^0)$ содержит знания о системе-оригинале, $Th(S)$ – знания о модели системы, $Th(B)$ – знания об отдельных её элементах.

Имитационные примеры $Rs = (Rb \cup Rd \cup Rm)$, где $Rb = \bigcup_{i=1, \dots, |B|} Rch^i$ – цепочки правил базы знаний, $Rd = \bigcup_{i,j} FMod(B_i, B_j)$, для которых $\exists (Rch^i, Rch^j) \mid Dep(Rch^i, Rch^j)$ или $Dep(Rch^i, Rch^j)$, $Rm = \bigcup FMod(B_1, \dots, B_p)$, $FMod(B_1, \dots, B_p)$ – режим функционирования групп элементов модели.

Контрольно-диагностические материалы $Q = (Q(Th) \cup Q(Rs))$, где $Q(Th)$ – вопросы по теоретическому материалу, $Q(Rs)$ – вопросы, касающиеся методов функционирования бортовых систем. Множество Q можно представить в виде группы множеств, определяемых объектом исследования, то есть

$Q=(Q(S^0)\cup Q(S)\cup Q(B))$, где $Q(S^0)$ – выполняет контроль знаний об исследуемой системе, $Q(S)$ – о модели её функционирования и $Q(B)$ – об отдельных элементах модели.

Предлагается метод персонализации процесса исследования, позволяющий формировать персональные траектории представления материалов для специалистов предметной области, на основе эталонных векторов, построенных по накопленной статистике обращений к материалам. В основе метода лежит алгоритм теории адаптивного резонанса – ART1 [60].

Назначение метода. Формирование индивидуальных траекторий исследования, учитывающих статистику обращений к материалам.

Область применения. Задачи персонализации и подбора вариантов на основе кластеризации характеристик для исследуемых данных.

Ограничения. Метод работает только с характеристиками, представленными в виде бинарных признаков.

Описание метода. Пусть имеются группы векторов-признаков E и эталонные векторы E^0 . Введём параметр Nv – максимальное количество кластеров и коэффициенты ρ и β : $0 \leq \rho \leq 1$, $\beta \geq 0$. Требуется сформировать классы характерных векторов-прототипов: $Pv=Pv_i$, $i=[1, \dots, Nv]$ и отнести к ним вектора-признаки, описывающие пользователей. $Pv=(Inf \cup (Th' \cap Q') \cup (Rs' \cap Q'))$, d – длина вектора.

На первом шаге алгоритма в качестве вектора прототипа выбирается первый эталонный вектор E_1^0 или первый вектор-признак E_1 , при отсутствии эталона ($E^0 = \emptyset$):

$$\begin{cases} Pv_1 = E_1, \text{ при } E^0 = \emptyset \\ Pv_1 = E_1^0, \text{ при } E^0 \neq \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

Все оставшиеся векторы-признаки проверяются на схожесть с вектором-прототипом. Условие проверки:

$$\frac{\|E\|}{(\beta+d)} < \frac{\|Pv_i\|}{\beta+\|Pv_i\|} \quad (2)$$

где $\| \quad \|$ – операция вычисления количества значимых элементов. Параметр β называется параметром «разрушения связи». Он позволяет выбирать прототипы, в

которых больше признаков имеют значение, равное 1, при условии, что все значения 1 в векторе-прототипе также присутствуют в тестируемом векторе признаков. То есть в случае, когда несколько векторов-прототипов содержат одинаковые характеристики вектора-признака, тогда выбирается вектор, у которого больше дополнительных признаков.

Из эталонных векторов, удовлетворяющих критерию (2), выбирается вектор, который максимально схож с вектором признаков пользователя:

$$\frac{\|Pv_i \cap E\|}{\|E\|} < \rho \quad (3)$$

где $\cap$ – операция побитового «И». Задачей параметра ρ является определение размера класса. Если значение параметра велико, образуются более крупные классы. При уменьшении значения создаются кластеры с меньшим количеством данных.

При выполнении условия (3) текущий вектор признаков добавляется к вектору-прототипу:

$$Pv_i \cap E \quad (4)$$

где i – номер вектора-прототипа. Изменение вектора-прототипа представляет собой слияние вектора признаков и вектора-прототипа с помощью выполнения операции побитового «И» между векторами.

Если (3) не выполняется, проверяется следующий вектор-прототип. Если все векторы-прототипы были проверены и при этом вектор признаков не был помещён в кластер, создаётся новый вектор-прототип из вектора признаков. Это приводит к формированию нового кластера, так как рассматриваемый вектор признаков не соответствует ни одному существующему кластеру. После обновления вектора-прототипа все векторы признаков проверяются на всех доступных векторах-прототипах: следует убедиться, что они находятся в нужных кластерах.

На начальных этапах метод работает с эталонными признаками, устанавливаемыми при формировании знаний. При накоплении статистики обучения она оказывает влияние на отнесение векторов к построенным классам. Индивидуальные

рекомендации строятся как комбинация рекомендаций на основе экспертных эталонных векторов и автоматической классификации по статистике обучения.

Применение кластеризации позволяет формировать индивидуальные рекомендации на основе схожести параметров рассматриваемого пользователя с параметрами других пользователей, характеризующихся схожими целями и динамикой получения знаний.

3.5. Анализ функционирования бортовых систем космических аппаратов на основе интеллектуальной имитационной модели

3.5.1. Постановка задачи испытаний бортовых систем

Поддержка технологии цифровых двойников требуется включать в них актуальные данные натурных испытаний. Предлагаются новые методы для подготовки и проведения испытаний и применения цифровых двойников для создания испытательных процедур и анализа получаемых от объекта контроля результатов.

Задача испытаний бортовой аппаратуры заключается в создании и передаче последовательности управляющих воздействий на объект контроля и обеспечении сбора, мониторинга и анализа данных, возникающих в результате его функционирования. Применение современных технологий проведения испытаний требует от конструктора высокой квалификации и широких знаний о различных особенностях функционирования объектов контроля. В процессе испытаний проводится проверка не только конструкционных деталей, но и логики работы, как самих устройств, так и комплексов, образующихся при взаимодействии объекта контроля со смежными системами и периферией. По способу создания управляющих воздействий и организации взаимодействия между системами испытания делятся на автономные и комплексные:

Автономные испытания проводятся без подключения объекта контроля к сопряжённому оборудованию. Роль систем окружения выполняют цифровые двойники. Результаты испытаний позволяют делать выводы о соответствии физических свойств объекта контроля и методов его функционирования заданным в

конструкторской документации требованиям. Во время проведения автономных испытаний выполняется измерительный и функциональный контроль. *Измерительный контроль (измерительные испытания)* представляет собой совокупность действий по измерению физических параметров объекта контроля в процессе его функционирования. *Функциональный контроль (функциональные испытания)* заключается в исследовании логики функционирования испытываемого оборудования и его реакций при взаимодействии с другими бортовыми системами. Для проведения этих испытаний используются программные имитаторы сопряжённых устройств. *Комплексные испытания* выполняются в составе комплекса бортовых систем с учётом их взаимодействия с объектом контроля. Они проводятся под управлением программного обеспечения предприятия-изготовителя космического оборудования – автоматизированного испытательного комплекса.

Предложены методы подготовки испытаний, обеспечивающие их проведение и анализ результатов на основе интеллектуальной имитационной модели [283, 286].

Объект контроля формально представляется как функционал преобразования входных переменных в выходные с заданными граничными условиями и допустимыми изменениями параметров и измеряемых величин: $O = \langle G^o, Y = F^o(X), T \rangle$, где O – объект испытаний; G^o – структура объекта; F^o – функционал, устанавливающий соответствие между входными переменными – X и выходными – Y , в моменты времени T ; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_0\}$ – моменты измерений; $X = \{x_1(t_i), x_2(t_i), x_m(t_i), w_1(t_i), \dots, w_s(t_i)\}$ – множество входных воздействий; $x_1(t_i), x_2(t_i), x_m(t_i)$ – входные параметры (параметры влияния); $w_1(t_i), \dots, w_s(t_i)$ – параметры функционирования объекта и внешней среды; m – число входных параметров, s – параметров функционирования. Все значения из X задаются в пределах их допустимой области; $Y = \{y_1(t_j), y_2(t_j), \dots, y_n(t_j), d_1(t_j), \dots, d_p(t_j)\}$ – выходные параметры; $y_1(t_j), y_2(t_j), \dots, y_n(t_j)$ – n контролируемых измерений; $d_1(t_j), \dots, d_p(t_j)$ – p неконтролируемых данных; $t_i, t_j \in T, t_j = t_i + \Delta t, \Delta t$ – таймаут ожидания данных [190]. Параметры

испытаний разделяются на телеметрические данные, физические характеристики объекта контроля и параметры системы испытаний, описывающие её состояние.

Задача испытаний объекта контроля ставится следующим образом: показать, что $\forall X^i = \{x_1(t_i), x_2(t_i), x_m(t_i), w_1(t_i), \dots, w_s(t_i)\} \exists y_k(t_j) \in \{Y^j = F(X^i)\}$. Причём $y_k(t_j) \in [y_k^* - \Delta y, y_k^* + \Delta y]$, $k = [1, \dots, n]$, n – количество наблюдаемых параметров, $y_k^* \in Y^*$ – эталонное значение из технической документации, Δy – допуск измерений. Для некоторых параметров граница задаётся только с одной стороны (определяется физическими свойствами параметра). Если $y_k(t_j) \notin [y_k^* - \Delta y, y_k^* + \Delta y]$, то $y_k(t_j)$ – недопустимое значение результатов испытаний.

Для параметров, заданных в имитационной модели, выполняется сравнение с результатами имитационного моделирования. Имитационная модель $S = \langle G, F, T \rangle$ описывает поведение объекта контроля и сопряжённых устройств. Структура объекта контроля G^o имеет отображение в множество G , содержащем структурно-параметрическое представление модели S . Если в модели заданы методы функционирования F , которые позволяют на основе начальных данных X^0 и входных параметров X^i получать выходные данные Y^m , то они могут рассматриваться в качестве эталонных значений при анализе результатов испытаний.

Задача испытаний объекта контроля в этом случае ставится следующим образом: X^i передаются в объект контроля и имитационную модель. Результаты моделирования Y^m сравниваются с результатами испытаний Y^j , то есть $Y^* = Y^m$, где Y^* – эталонные значения. Проверяется выполнение условия: $\forall y_k(t_j) \in Y^j$, $y_k(t_j) \in [y_k^* - \Delta y, y_k^* + \Delta y]$, $d_k(t_j) \in [d_k^* - \Delta d, d_k^* + \Delta d]$, $y_k^*, d_k^* \in Y^*$. В этом случае анализ проводится не только на контролируемых параметрах, а на всех, получаемых в результате имитационного моделирования. Такой подход расширяет возможности контроля результатов испытаний. Кроме того, имитационная модель применяется для разработки методик испытаний и построения имитаторов бортовых систем. Детализация модели обеспечивает исследование различных особенностей поведения объекта контроля.

3.5.2. Сценарный метод поддержки автономных испытаний

Сценарий – это формализованное представление процесса проведения испытаний в виде последовательности испытательных действий для определения количественных и качественных характеристик функционирования объекта контроля.

Назначение метода. Сценарный метод предназначен для поддержки подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата. Метод позволяет описывать испытания в виде набора взаимосвязанных абстракций, представляющих отдельные элементы сценария, выполнять синтаксический и семантический контроль, обеспечивать работу с логическими имитаторами устройств, документировать ход проведения испытаний, выполнять контроль и визуализацию результатов, а также послесезансный анализ данных.

Область применения. Метод предназначен для построения программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры и является ключевым элементом для поддержки взаимодействия аппаратного обеспечения и объекта контроля (Рисунок 21).

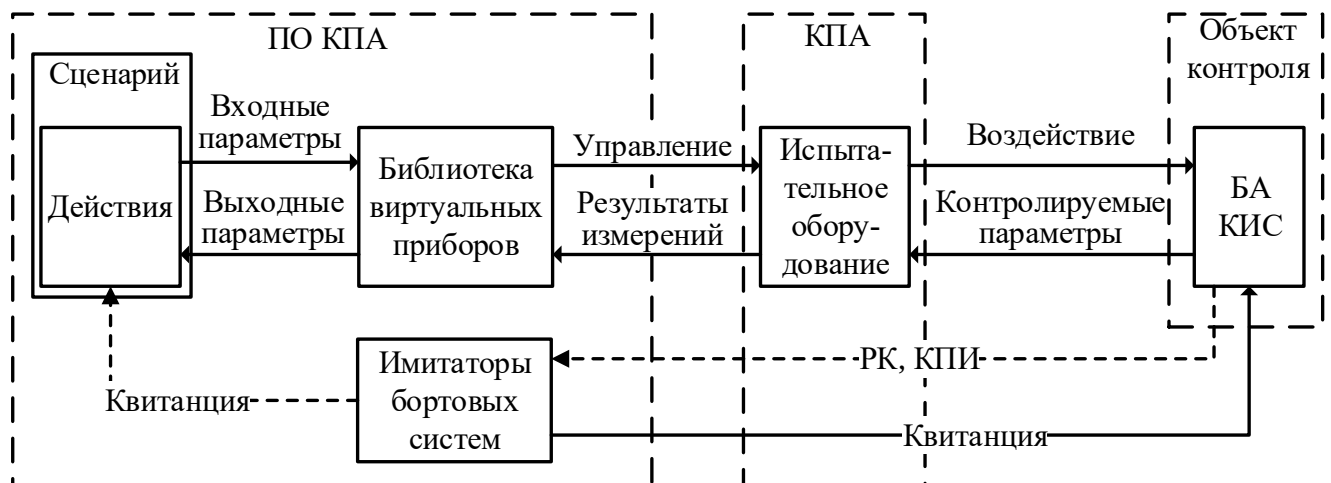


Рисунок 21 – Схема организации автономных испытаний

Ограничения. Испытательные функции сценариев ограничены составом измерительного оборудования и библиотекой виртуальных приборов.

Описание метода. Введём формальное описание абстракций, представляющих основные структурные элементы сценария. Минимальным элементом сценария

рия является действие [174]. *Действие* представляет собой метод управления оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры или метод измерения параметров функционирования объекта контроля. Для каждого действия выполнена его реализация в библиотеке программ работы с оборудованием. Действие характеризуется своим наименованием, набором входных и выходных параметров и настроек. Множество действий $Act = \{Act_p, p=1, \dots, |Act|\}$, где $|Act|$ – общее число действий в сценарии. Для каждого действия задана программа выполнения измерений или получения данных, обозначим её VI_p , где p – номер действия. Программа по множеству входных параметров $X^p \subseteq X$ возвращает выходные параметры $Y^p \subseteq Y$. Перечень параметров для каждого действия различается, обозначим подмножества параметров индексом p .

В общем случае действие $Act_p = \langle N_A, X^p, Y^p = VI_p(X^p), Tun(X^p), Mpar(Y^p), StartA, StopA \rangle$, где N_A – наименование действия, X^p – входные значения переменных действия, Y^p – переменные для получения результатов измерений, VI_p – программа из библиотеки виртуальных приборов, $Tun(X^p)$ – настройки параметров действия и испытательного оборудования, $Mpar(Y^p)$ – настройки параметров мониторинга, $StartA$ – условие запуска действия, $StopA$ – условие остановки его выполнения. Настройки действия предназначены для конфигурирования измерительного оборудования или выбора управляющего воздействия на объект контроля. Параметры мониторинга задают измеряемые характеристики, границы допустимых значений, критерии контроля и способы отображения данных. Условия запуска и остановки позволяют задавать ветвления в цепочке выполнения действий, в зависимости от полученных результатов измерений.

В структуре сценария действие можно схематично представить в виде графического блока прямоугольной формы (Рисунок 22).

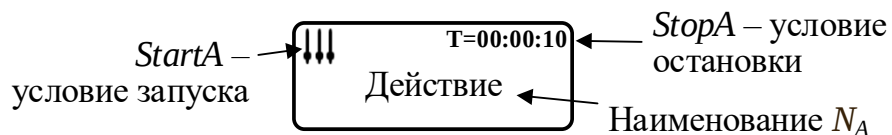


Рисунок 22 – Графическое представление действия

В центре блока располагается наименование N_A , в верхней части – обозначение условий запуска действия и условий остановки его выполнения. Последовательности различных действий объединяются в структурные элементы, названные в данной технологии заданиями. *Задание* представляет собой совокупность действий с описанием порядка их выполнения, направленных на решение определённой задачи в сценарии испытаний. Каждое задание является законченной последовательностью действий, выполнение которой не зависит от выполнения других заданий. Множество заданий $Tsk = \{Tsk_q, q=1, \dots, |Tsk|\}$, где $|Tsk|$ – число заданий в сценарии, задание $Tsk_q = \langle N_T, [Act_r \in Act, BeginSt(Act_r), EndSt(Act_r), 1 \leq r \leq |Act|] \rangle$, где N_T – наименование задания, Act_r – множество действий, настроенных для решения задачи, $BeginSt(Act_r)$ – начальный этап выполнения действия в задании, $EndSt(Act_r)$ – конечный этап. Одно и то же действие может выполняться в задании с разными значениями входных данных, настроек и на разных этапах. Графическая структура задания показана на рисунке (Рисунок 23).

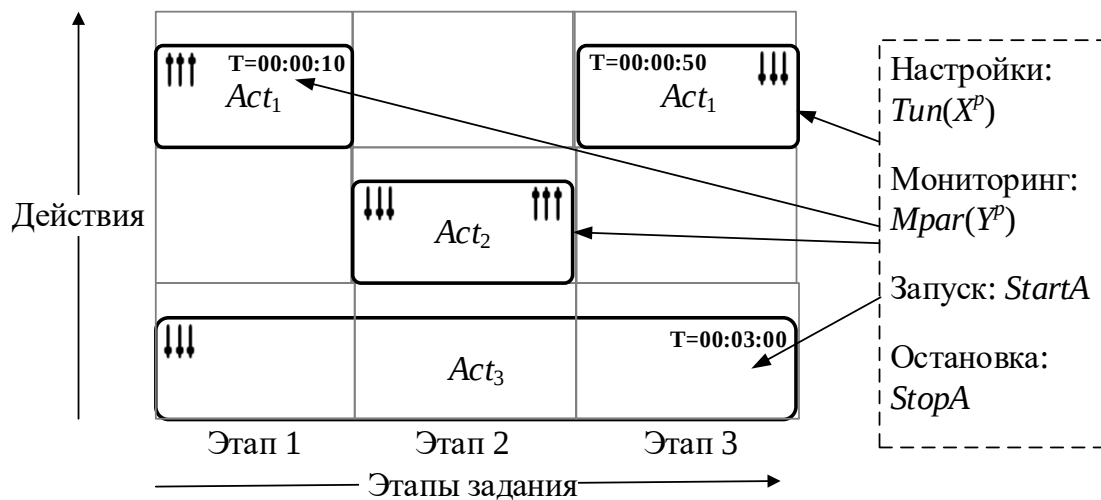


Рисунок 23 – Графическая структура задания

Для определения последовательности выполнения действий и их длительности предлагается понятие этапа. Этап – это интервал, который определяет период проведения измерений, соответствующих действию. В одном задании может быть выбрано несколько действий или задано одно и то же действие, определяющее метод испытаний, но с различными характеристиками. Для одного действия Act_p в задании могут задаваться различные настройки $Tun(X^p)$, параметры мониторинга

$Mpar(Y^p)$, условия запуска $StartA$ и условия остановки $StopA$. Действия могут выполняться в течение одного или нескольких этапов, параллельно либо последовательно.

Количество этапов в задании определяется как $nt = \max_{1 \leq r \leq |Act|} EndSt(Act_r) - \min_{1 \leq r \leq |Act|} BeginSt(Act_r) + 1$. Расположение нескольких действий на одном этапе описывает их параллельное выполнение, на разных этапах – последовательное. За этап с номером m ($1 \leq m \leq nt$) выполняются все действия, для которых $BeginSt(Act_r) \leq m \leq EndSt(Act_r)$. Действия, для которых $BeginSt(Act_r) = m$, начинают выполнение на этапе с номером m . Этап $(m+1)$ начинается только после окончания всех действий, для которых $EndSt(Act_r) = m$. Обозначим действия, выполняемые на этапе m , как $Tsk_q[m]$. Задание может быть описано в виде подмножества действий, выполняемых на каждом этапе: $Tsk_q = Tsk_q[1] \cup \dots \cup Tsk_q[m] \cup \dots \cup Tsk_q[nt]$, где $m = 1, \dots, nt$. На основе заданий строятся сценарии испытаний.

Сценарий – это последовательность заданий, описывающая методику проведения испытаний. Сценарий включает совокупность параллельно-последовательных измерительных операций, циклов, условных переходов и критериев контроля. Графически сценарий представляется аналогично заданию, только элементом, размещенным по оси этапов, являются сами задания. Множество сценариев $Sc = \{Sc_r, r = 1, \dots, |Sc|\}$, $|Sc|$ – количество сценариев испытаний для объекта контроля. Каждый сценарий Sc_r включает подмножество заданий, выполняемых по этапам: $Sc_r = \langle N_s, [Tsk_q \in Tsk, BeginSt(Tsk_q), EndSt(Tsk_q), Cy(Tsk_q), 1 \leq q \leq |Tsk|] \rangle$, где N_s – наименование сценария, Tsk_q – множество заданий в сценарии, $|Tsk|$ – количество заданий, $BeginSt(Tsk_q)$ – начальный этап выполнения задания Tsk_q , $EndSt(Tsk_q)$ – конечный этап выполнения задания Tsk_q , $EndSt(Tsk_q) \geq BeginSt(Tsk_q)$, $Cy(Tsk_q)$ – количество циклов выполнения задания в сценарии. Задание может выполняться в цикле для многократной проверки функционирования определённой подсистемы или режима работы объекта контроля. Продолжительность выполнения заданий в сценарии заранее неизвестна, так как

они состоят из действий, запуск и остановка которых может происходить не по времени, а при выполнении логических условий. Количество этапов сценария определяется как:

$$ns = \max_{1 \leq q \leq |Tsk|} EndSt(Tsk_q) - \min_{1 \leq q \leq |Tsk|} BeginSt(Tsk_q) + 1.$$

Начальный и конечный этапы позволяют сформировать параллельно-последовательную структуру выполнения заданий в сценарии. Аналогично структуре задания сценарий может быть представлен в виде последовательности этапов: $Sc_r = Sc_r[1] \cup \dots \cup Sc_r[l] \cup \dots \cup Sc_r[ns]$, $l=1, \dots, ns$, где $Sc_r[l]$ – подмножество заданий l -го этапа. Структурные элементы, необходимые для формирования сценария, показаны на синтаксической диаграмме [39, 42, 145] (Рисунок 24).

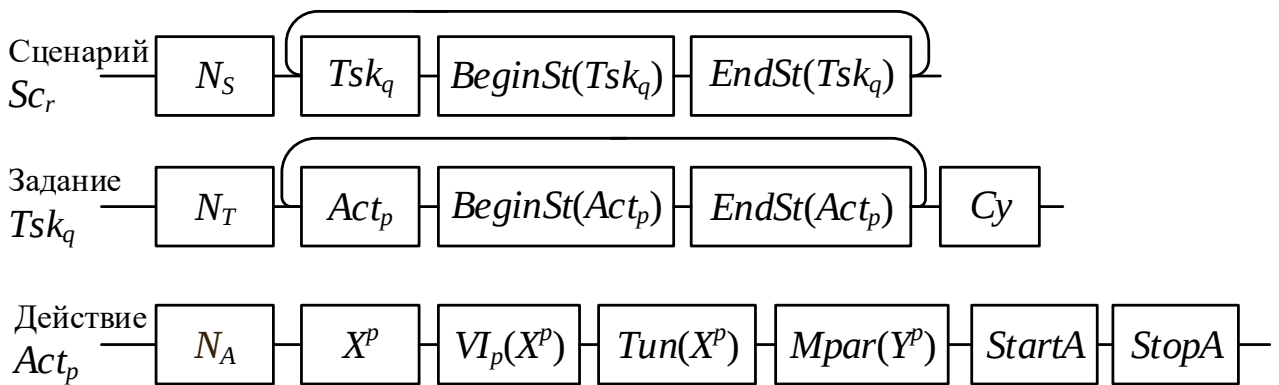


Рисунок 24 – Синтаксическая диаграмма сценария

Узлы синтаксической диаграммы описывают элементы сценария, линии – последовательность задания элементов, дуги – возможность их повторения.

Предложенная структура позволяет создавать инструменты автоматизации подготовки сценариев, выполнять их синтаксический контроль и повышает эффективность подготовительных процессов испытаний.

Алгоритм выполнения сценария показан на рисунке (Рисунок 25). Процесс выполнения сценариев представляет собой упорядоченную последовательность шагов, определяемых заданными в его описании этапами. На каждом шаге анализируется состав сценария и выбираются задания Tsk_s , начало которых совпадает с текущим этапом, то есть на l -м этапе $BeginSt(Tsk_s)=l$. Эти задания помещаются в список и выполняются столько раз, сколько указано в параметре Cy .

Переход к следующему этапу происходит только после завершения всех заданий, для которых $EndSt(Tsk_s)=l$. Задания, для которых $En(Tsk_s)>l$, продолжают выполнение при переходе к следующему этапу сценария. Для выполнения задания вызывается метод «Run Tsk_s ».

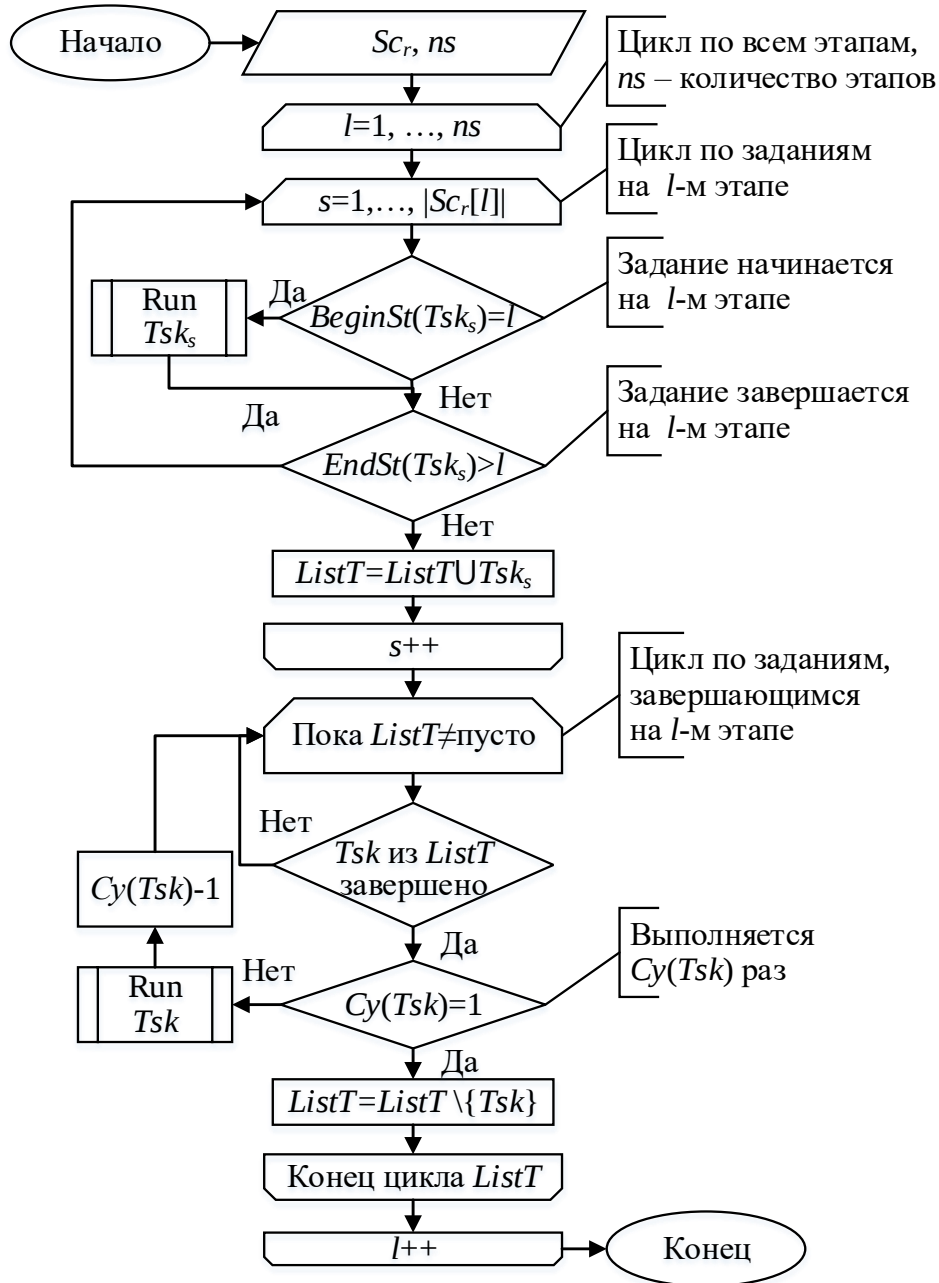


Рисунок 25 – Алгоритм выполнения сценария испытаний

Алгоритм выполнения задания показан на рисунке (Рисунок 26).

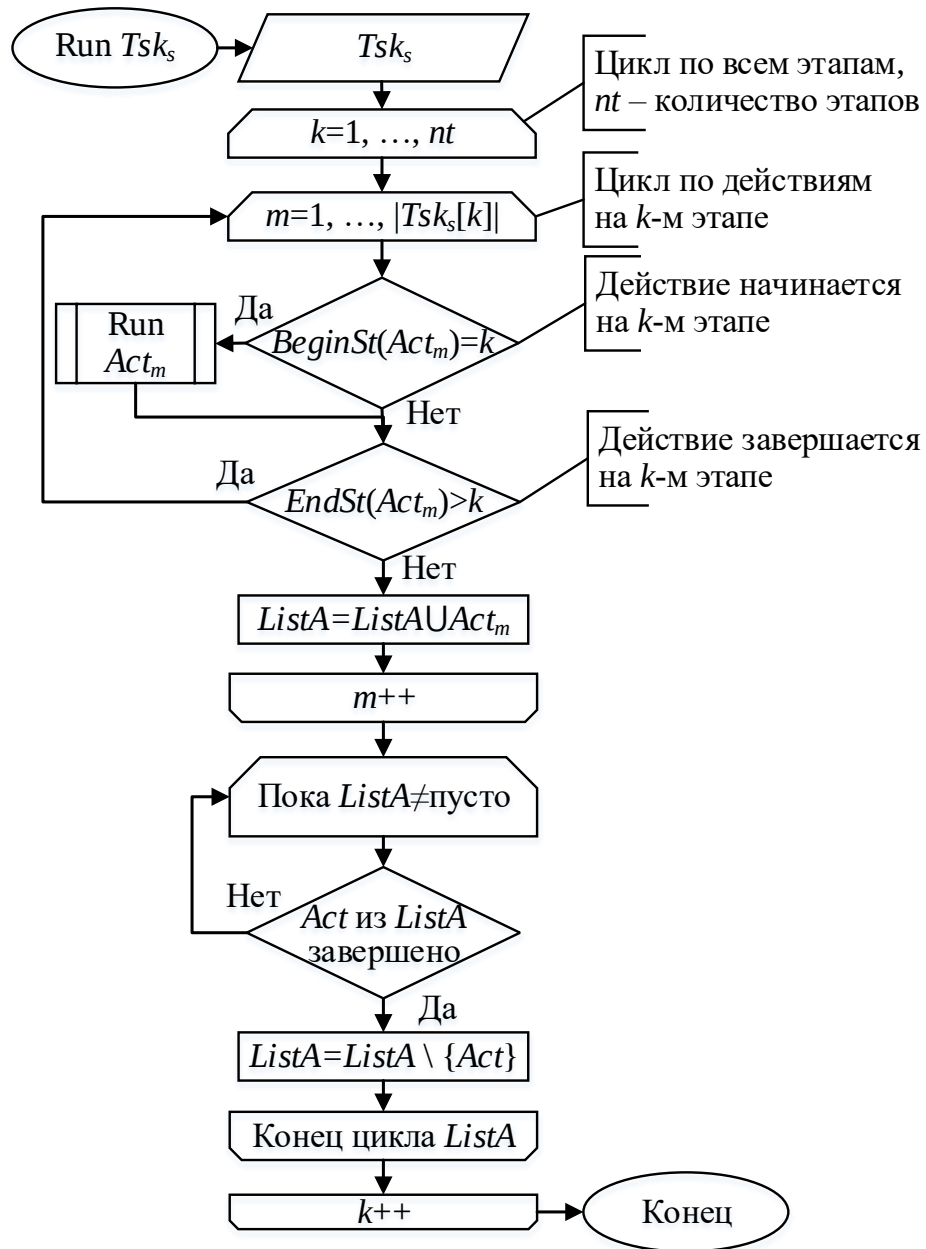


Рисунок 26 – Алгоритм выполнения задания в сценарии

Алгоритм определяет поэтапный выбор действий, для которых $BeginSt(Act_m)=k$, где k – текущий этап задания. Действия выполняются методом «Run Act_m ». Переход к следующему этапу задания осуществляется только после завершения всех действий, для которых $EndSt(Act_m)$ – текущий этап.

Алгоритм выполнения действия показан на рисунке (Рисунок 27).

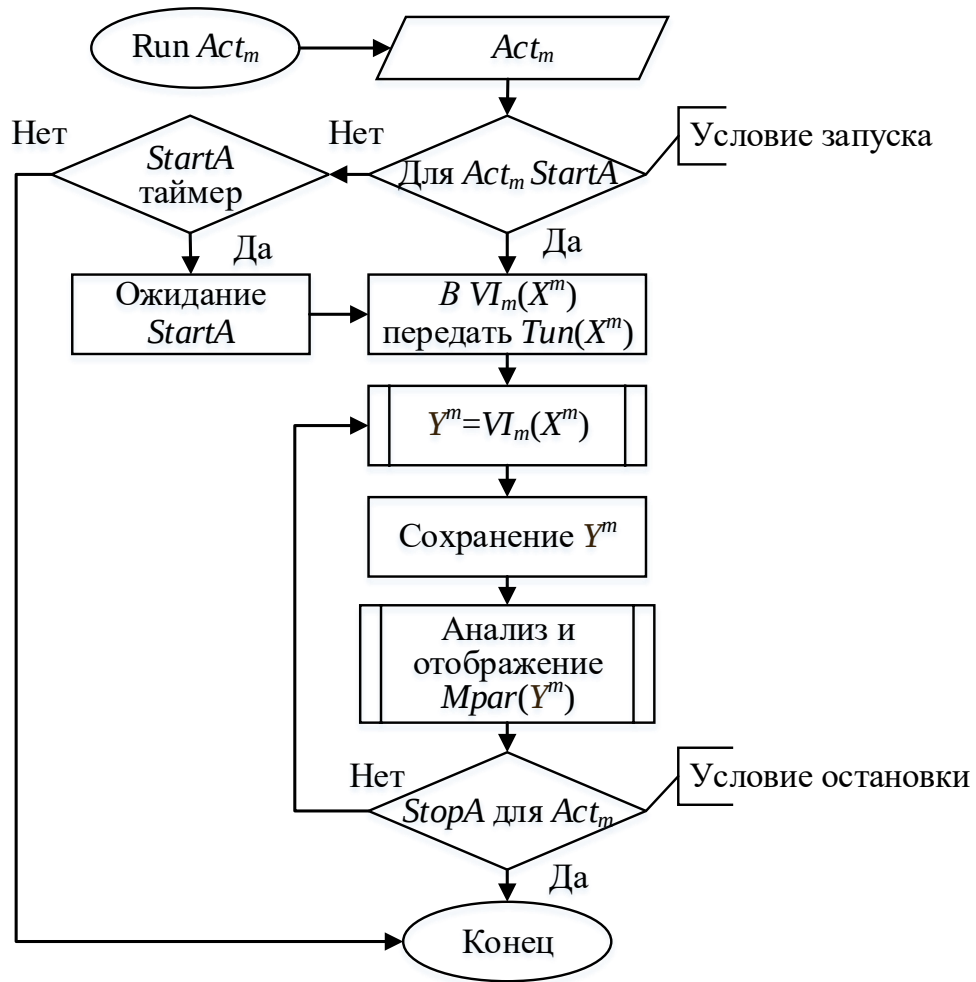


Рисунок 27 – Алгоритм выполнения действия в задании

Для выполнения действия проверяется условие запуска $Bg_con(Act_m)$. Если условие содержит таймер, то устанавливается период ожидания в соответствии со значением таймера. Если для действия Act_m заданы условия запуска ($StartA$), то на основании их проверки алгоритм завершается (при невыполнении) или вызывается программа работы с оборудованием VI_m , в которую передаются параметры X^m и настройки $Tun(X^m)$. Длительность 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 и визуализируются, настройки анализа и отображения заданы в параметре $Mpar(Y_m)$.

Сложность метода определяется сложностью формирования сценария C_{cr} , зависящей от сложности действий $C(act)$ и сложностью его выполнения C_{exe} ,

определяемой на основе сложности выполняемых оборудованием КПА программ $C(VI)$:

$$C_{cr} = \sum_{r=1}^{|Sc|} \sum_{q=1}^{|Tsk_r|} \sum_{p=1}^{|Act_q|} C(act_p \in Act_q), \quad C_{exe} = \sum_{r=1}^{|Sc|} \sum_{q=1}^{|Tsk_r|} \sum_{p=1}^{|Act_q|} C(VI_p \in Act_q).$$

Интерпретация результатов. Результатом работы метода являются сценарии испытаний, направленные на проведение функционального и измерительного контроля (Рисунок 28).

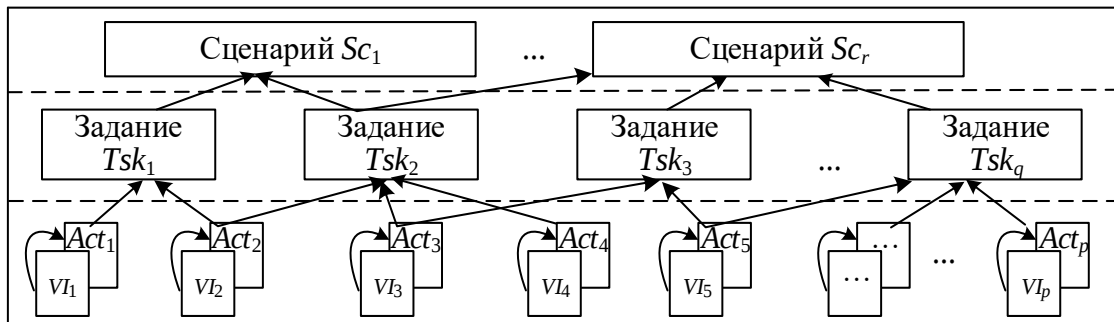


Рисунок 28 – Результат работы метода

Методики испытаний декомпозируется на подзадачи, которые реализуются в виде заданий, в которые в свою очередь входят действия, представляющие собой указания на методы взаимодействия с оборудованием из библиотеки виртуальных инструментов.

3.5.3. Метод поддержки комплексных испытаний

Комплексные испытания выполняются в составе комплексов бортовых систем, объединяющих одно или несколько сопряжённых устройств. Испытания проводятся под управлением автоматизированного испытательного комплекса предприятия (АИК). В его задачи входят передача команд управления на контрольно-проверочную аппаратуру систем космического аппарата, приём и анализ пакетов телеметрии, содержащей сведения о состоянии бортовых систем и испытательного оборудования.

Назначение метода – поддержка взаимодействия автоматизированного испытательного комплекса с объектом контроля посредством контрольно-проверочной аппаратуры.

Область применения. Метод применяется при проведении комплексных испытаний командно-измерительных систем в составе бортовой аппаратуры космического аппарата и выполняет трансляцию испытательных процедур в объект контроля и получаемых от него данных – в автоматизированный испытательный комплекс (Рисунок 29).

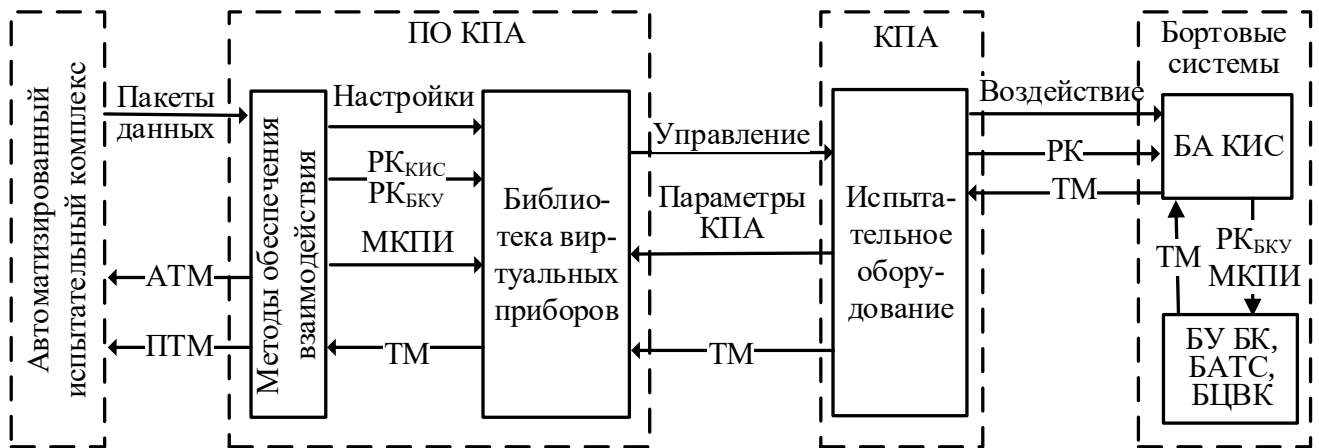


Рисунок 29 – Схема организации комплексных испытаний

От АИК поступают пакеты команд и массивы командно-программной информации (МКПИ). Команды от АИК преобразуются в команды для управления контрольно-проверочной аппаратурой ($РК_{КПА}$), управления командно-измерительной системой ($РК_{КИС}$) и команды бортового комплекса управления ($РК_{БКУ}$). В АИК от объекта контроля передаются квитанции на отработанные команды, телеметрическая информация, а также сообщения в протокол испытаний. Телеметрическая информация поступает от контрольно-проверочной аппаратуры – адресная телеметрия (АТМ) и от объекта контроля – позиционная (ПТМ).

Ограничения. Метод реализует правила взаимодействия, определяемые транспортным и информационным протоколами. Конфигурация приемо-передающих функций КПА выполняется командами $РК_{КПА}$.

Описание метода. Для формирования испытаний определены множество команд, способы задания квитанций на команды, структуры и способы формирова-

ния адресной и позиционной телеметрии. Синтаксическая диаграмма метода поддержки комплексных испытаний приведена на рисунке (Рисунок 30). Множество команд: $K = K_{КИС} \cup K_{БКУ} \cup K_{КПА}$, где $K_{КИС}$ – подмножество команд, предназначенных для командно-измерительной системы, $K_{БКУ}$ – множество команд для бортового устройства бортового комплекса управления, $K_{КПА}$ – команды управления КПА. Структуры команд заданы в множестве D^k . Структуры телеметрии: D^t (ТМ объекта контроля), D^{t-A} (адресная ТМ), D^{t-P} (позиционная ТМ).

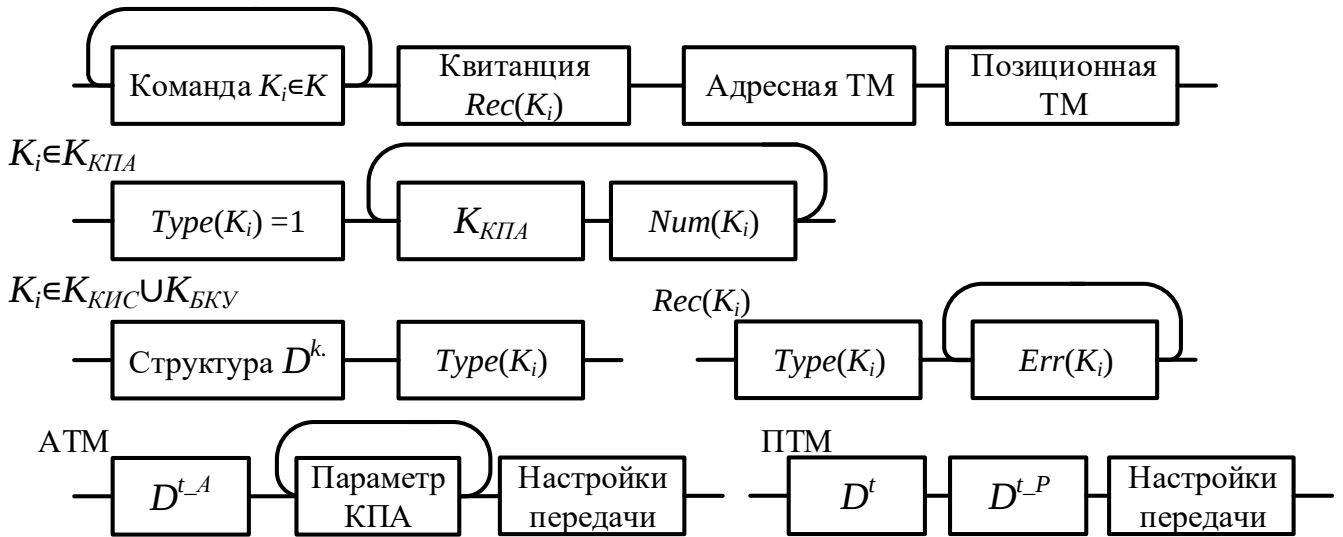


Рисунок 30 – Синтаксическая диаграмма метода поддержки комплексных испытаний

Алгоритм поддержки информационного взаимодействия [314] между АИК и объектом контроля показан на рисунке (Рисунок 31).

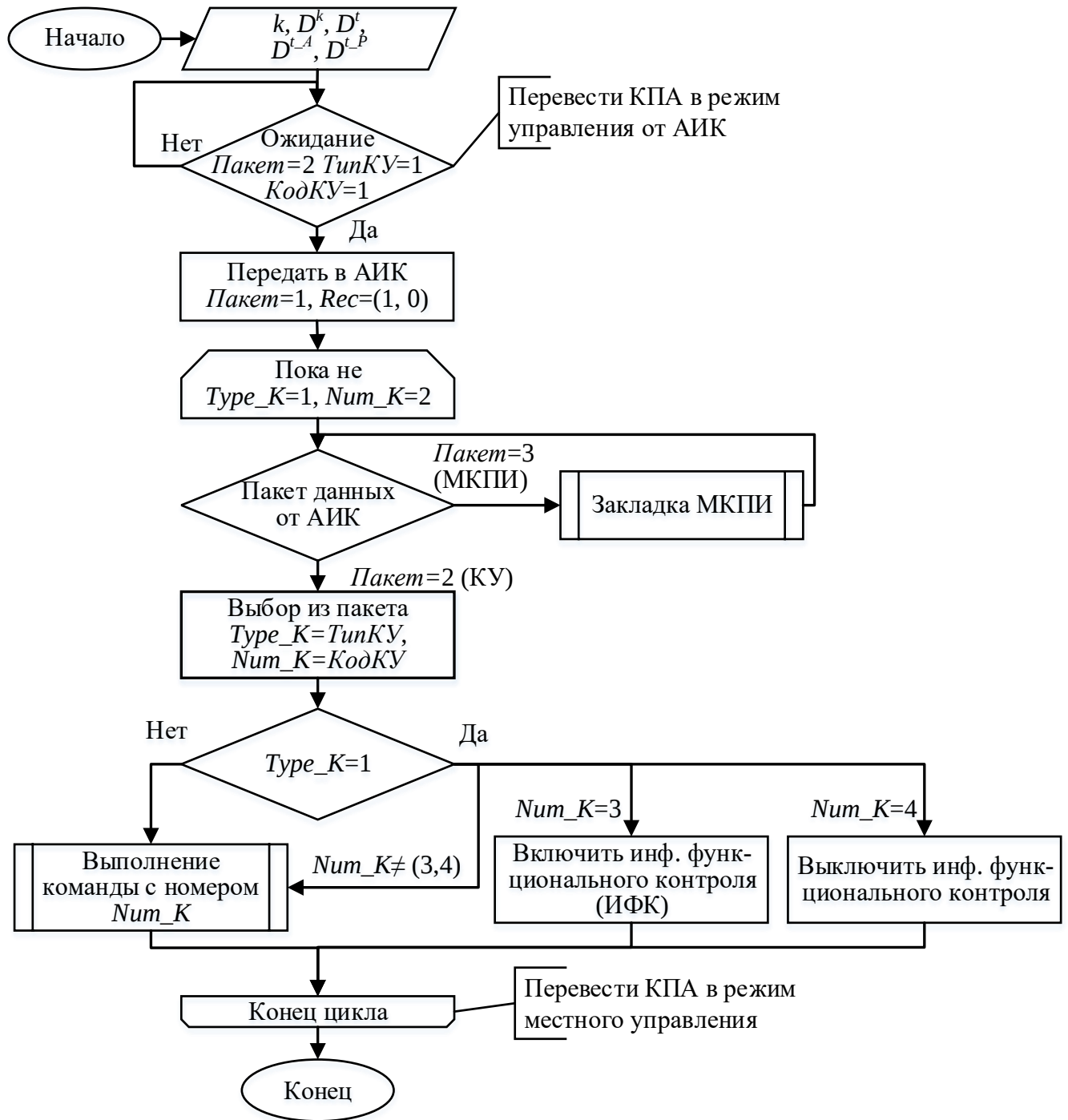


Рисунок 31 – Алгоритм поддержки комплексных испытаний

В соответствии с транспортным протоколом от АИК поступают пакеты данных. Тип пакета определяет его назначение, формат и состав информации. В пакете указан тип команды $Type(K_i)$ и её номер $Num(K_i)$. Значение

$$Type(k_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } k_i \in K_{\text{КПА}} \\ 2, & \text{если } k_i \in K_{\text{КИС}}, Num(k_i) = i \ (1 \leq i \leq Nk, \text{ где } Nk = |K_{\text{КИС}}| + |K_{\text{БКУ}}| + |K_{\text{КПА}}|) \\ 3, & \text{если } k_i \in K_{\text{БКУ}} \end{cases}$$

Для каждого типа команд определён пакет в структуре D^k , который требуется передать в КПА или объект контроля. Реакцией на команду является квитанция $Rec(k_i)$, которая содержит тип пакета и код возврата. Тип пакета устанавливается в соответствии с типом данных $Type(k_i)$, на которые формируется квитанция. Код возврата $Err(Type(k_i))$ равен значению кода ошибки, $Rec(k_i) = (Type(k_i), Err(Type(k_i)))$. Алгоритм выполнения команды показан на рисунке (Рисунок 32).

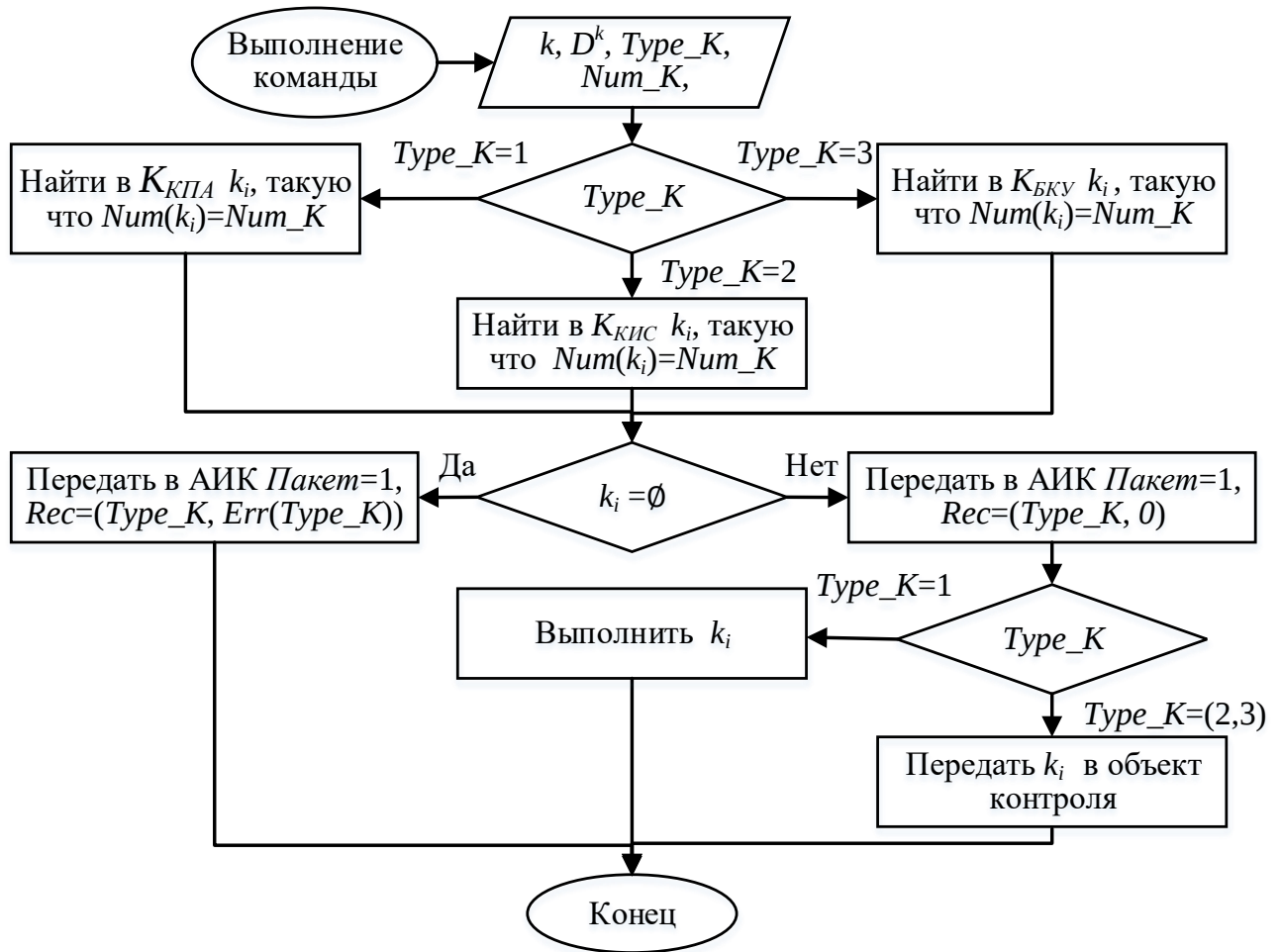


Рисунок 32 – Алгоритм выполнения команды

После получения команды она анализируется и определяется её тип. Каждая команда квитируется, пакет с квитанцией передаётся в АИК. Команды $K_{КПА}$ задают настройки параметров приёма-передающего тракта при получении от объекта контроля телеметрической информации или передачи РК и КПИ (ВЧ/НЧ). При изменении настроек процесс приёма-передачи выполняется с новыми параметрами. Команды $K_{КИС}$ и $K_{БКУ}$ передаются в объект контроля. Для этого по типу команды определяется подмножество команд из базы данных, выбирается пакет с

командой, имеющей соответствующий номер, и отправляется в объект контроля. Команды поступают от АИК и выполняются на фоне приёма телеметрии и обмена текстовыми сообщениями.

Алгоритм передачи адресной телеметрии показан на рисунке (Рисунок 33).

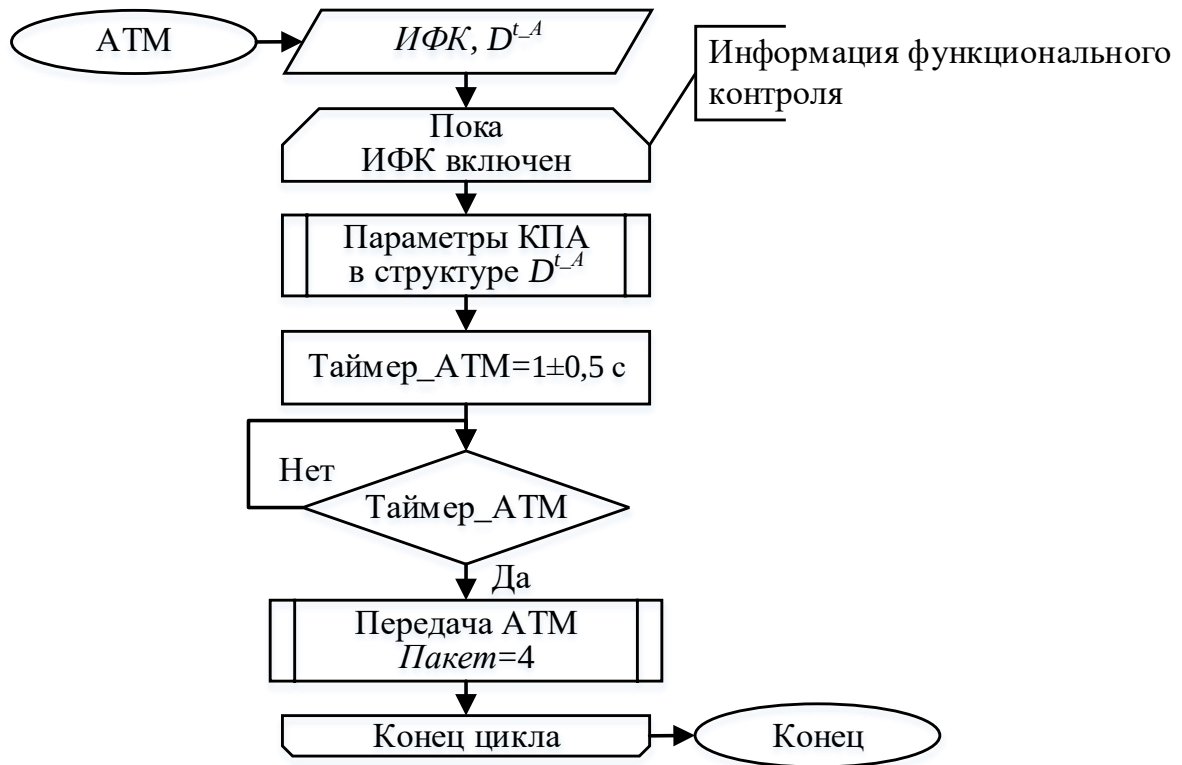


Рисунок 33 – Алгоритм передачи АТМ

Для адресной телеметрии предлагается структура D^{t-A} , для позиционной – D^{t-P} . АТМ используется для инициативной передачи текущего состояния КПА при его изменении. В соответствии заданным период передачи формируется пакет АТМ в структуре D^{t-A} , который содержит значения всех параметров КПА, определённые в информационном протоколе. К таким параметрам относятся: режим обмена с бортом, настройки приёмо-передающего тракта (скорость передачи РК, КПИ и ТМ, адрес дешифратора, идентификатор МАР), параметры передачи (захват ТМ, захват несущей) и работы оборудования КПА (напряжение, температура и загрузка источника бесперебойного питания, значения датчиков температуры, влажности, дыма и др.). Сформированный пакет текущего (исходного) состояния всех адресных параметров передаётся в АИК. В дальнейшем по истечении задан-

ного промежутка времени выбираются изменения параметров КПА, они заносятся в пакет по принципу сборки из произвольного количества параметров. Идентификация в пакете выполняется по адресу параметра. АТМ формируется и передаётся в АИК в пакете с типом 4.

Алгоритм передачи ПТМ показан на рисунке (Рисунок 34).

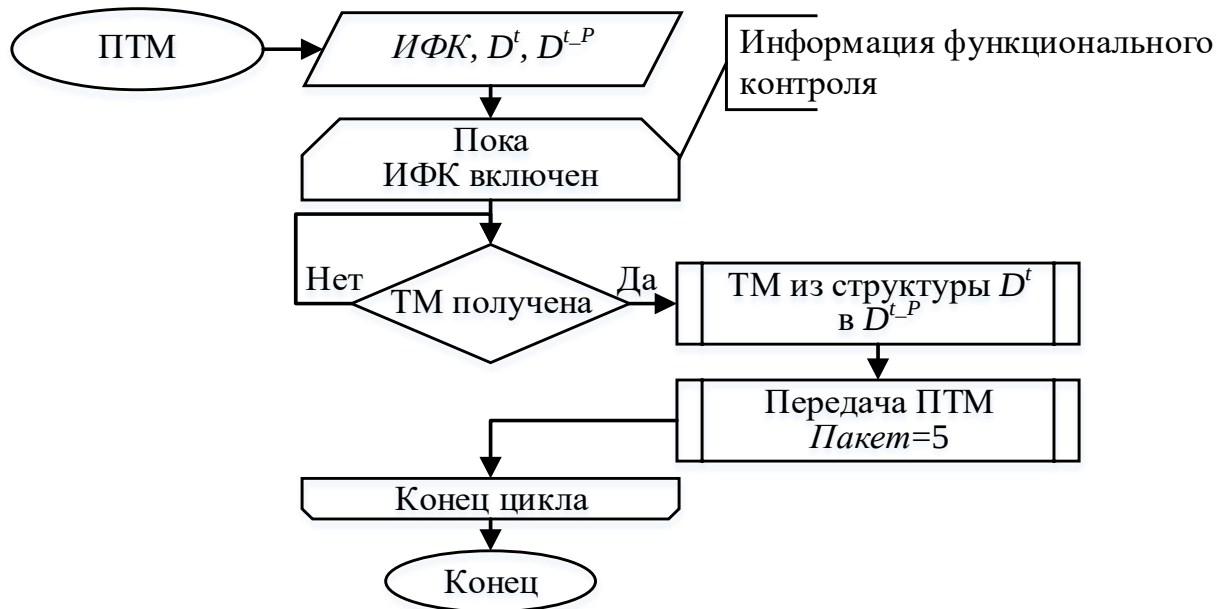


Рисунок 34 – Алгоритм передачи ПТМ

Позиционная телеметрия предназначена для передачи телеметрического кадра объекта контроля. Телеметрия поступает в структуре D^t и для передачи её в АИК используется пакет в структуре D^{t-P} , заданной в транспортном протоколе. Телеметрия объекта контроля преобразуется в пакет ПТМ и передаётся в АИК по мере её поступления.

Сложность метода определяется сложностью преобразования пакетов данных в команды управления КПА (сложность C_1), команды объекта контроля (C_2) и бортового комплекса (C_3):

$$C = \sum_{i=1}^{\max \text{Type}(K)} C_i \times |\text{Sel}(K, \text{Type}(k \in K) = i)|.$$

Интерпретация результатов. Взаимодействие с АИК устанавливается командами «Перевести КПА в режим управления от АИК» и «Перевести КПА в режим местного управления». Команды «Включить информацию функционального

контроля» и «Выключить информацию функционального контроля» определяют процесс передачи телеметрической информации. Все получаемые пакеты команд, телеметрические данные и результаты испытаний отражают информационный обмен между АИК и объектом контроля в полном объёме.

3.5.4. Метод поддержки испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой

Назначение метода. Формирование испытательных процедур на основе алгоритмов информационного взаимодействия имитаторов бортовых систем и проведение испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата.

Область применения. Метод предназначен для использования в составе контрольно-проверочной аппаратуры, может применяться самостоятельно или в интеграции со сценарным методом поддержки автономных испытаний.

Ограничения. Метод основан на интеллектуальной имитационной модели и использует заданные в ней параметры и настройки имитаторов бортовых систем.

Описание метода. Синтаксическая диаграмма метода испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой [79] приведена на рисунке (Рисунок 35).

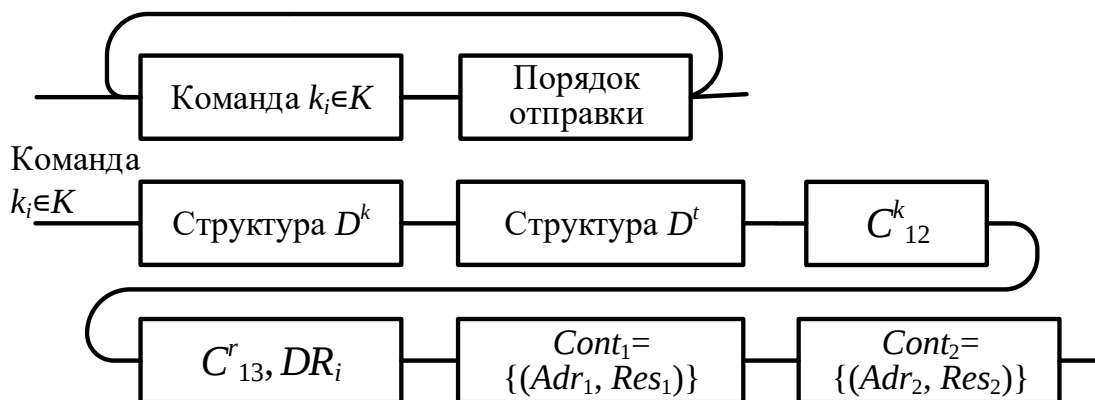


Рисунок 35 – Синтаксическая диаграмма метода испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой

Формирование испытаний сводится к заданию для каждой команды $k_i \in K$ ($i=1, \dots, |K|$, где $|K|$ – число команд) параметров, которые определяют поведение имитаторов в соответствии с выбранным вариантом командно-программного управления и порядка отправки команд (автоматически, циклически с заданным числом повторений, время ожидания реакции на команду, количество попыток отправки и пр.).

К параметрам испытаний относятся: D^k – «Структура пакета данных команды», D^t – «Структура телеметрии», C_{12}^k – «Интерфейс НС – КИС», C_{13}^r «Интерфейс МИ КИС – БКУ», DR_i – ожидаемое значение по интерфейсу C_{13}^r , $Cont(k_i) = \{(Adr, Res)\}$ – множество критериев контроля параметров телеметрии для команды k_i , поступающей с C_{12}^t . Adr – адрес параметра в телеметрии, Res – значение для сравнения. Множество критериев разбито на два подмножества: $Cont(k_i) = Cont_1(k_i) \cup Cont_2(k_i)$, где $Cont_1(k_i)$ – «Контроль квитанции по ТМ», $Cont_2(k_i)$ – «Контроль реакции на команду».

Сложность метода зависит от сложности выбора критерия C_{sel} , и сложности его проверки C_{ch} :

$$C = \sum_{i=1}^{Nk} \sum_{j=1}^{|Cont(k_i)|} [C_{sel}(Cont_j(k_i)) + C_{ch}(Cont_j(k_i))].$$

Интерпретация результатов. Построенные испытательные процедуры содержат параметры приёма/передачи данных и настройки имитаторов окружения объекта контроля в соответствии с алгоритмами прохождения команд и анализа телеметрической информации. Представленный подход обеспечивает информационную преемственность структур данных и команд от имитационной модели к методам автоматизации испытаний.

3.6. Формирование методики испытаний на основе базы знаний имитационной модели

Назначение метода. Метод обеспечивает применение цифровых двойников для подготовки испытаний бортовых систем. Параметры испытаний и критерии контроля выбираются из базы знаний интеллектуальной имитационной модели.

Область применения. Применяется для испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой [84].

Ограничения. Последовательности команд, способы их передачи и критерии анализа прохождения ограничены составом базы знаний имитационной модели.

Описание метода. Алгоритм, показывающий последовательность действий, приведён на (Рисунок 36).

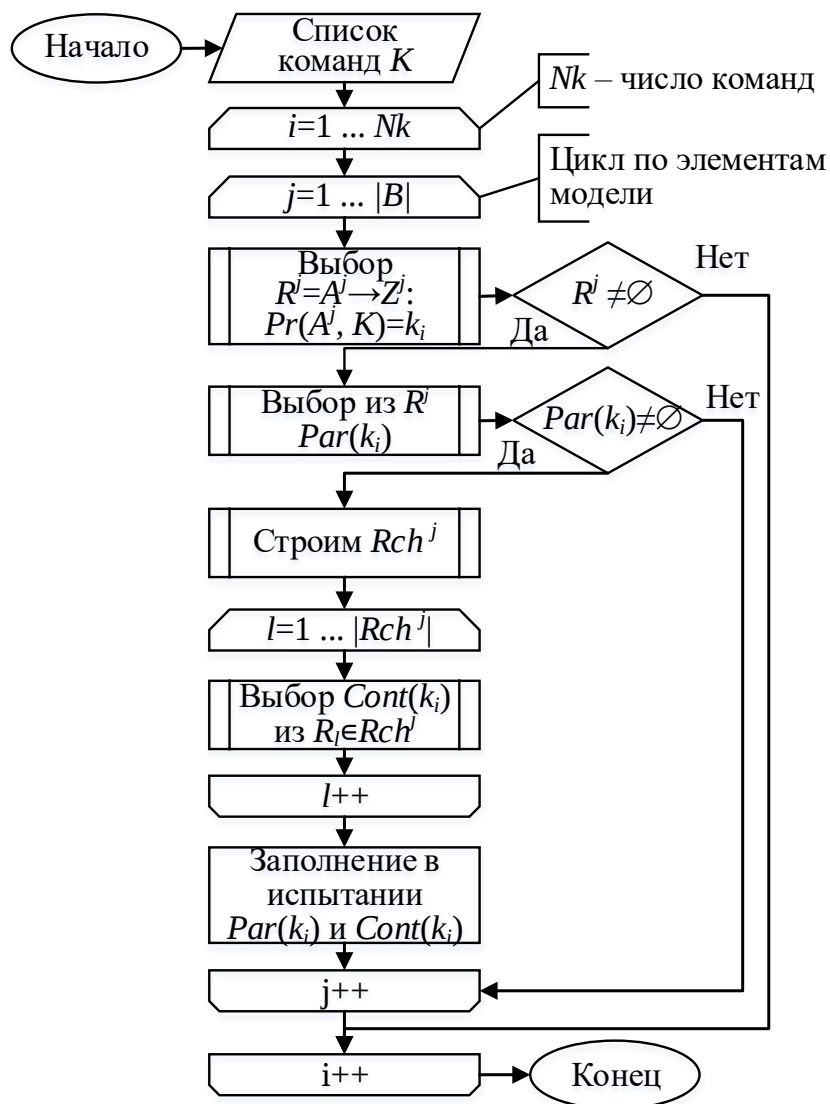


Рисунок 36 – Алгоритм формирования испытательных процедур

На первом шаге выбираются команды и определяется последовательность их передачи. Далее формируется подмножество правил базы знаний, определяющее порядок работы имитаторов наземных и бортовых систем при моделировании передачи выбранных команд [289]. Правила описывают последовательности приема и передачи команд, а также критерии анализа телеметрической информации.

Выбираются правила $(R^j: A^j \rightarrow Z^j)$, в которые входит команда, то есть $Pr(A^j, K) = k_i$. По таким правилам R^j строятся цепочки Rch^j , выполняемые в процессе логического вывода. Определяются коммутационные соединения, по которым выполняется передача команд (множество C^k), ответов на команды (множество C^r) и телеметрической информации (множество C^t). Правила, описывающие передачу данных по этим соединениям $(C^k \cup C^r \cup C^t) \in C$ входят в построенную цепочку правил. Из правил формируем параметры приёма-передачи: D^k – структуры команд, D^t – 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. Обозначим полученные параметры $Par(k_i)$. По выбранным правилам формируются критерии контроля прохождения команд, заданные в виде пар $(Adr(k_i), Res(k_i))$, где $Adr(k_i)$ – адрес параметра в телеметрии, $Res(k_i)$ – значение для сравнения. Обозначим их $Cont(k_i)$. Найденные параметры и критерии контроля автоматически передаются в программу испытаний.

Сложность метода определяется множеством правил отработки команд, заданных в базе знаний:

$$C = \sum_{i=1}^{|K|} \sum_j^{|B|} \sum_{r \in Sel(R^j, k_i)} \sum_{l=1}^{|Sel(Rch^j, r)|} C(rch_l \in Sel(Rch^j, r)).$$

Интерпретация результатов. Метод упрощает процессы подготовки испытательных процедур. Анализ характеристик исследуемых объектов выполняется на программных моделях – цифровых двойниках функционирования бортовых систем, а затем на их основе формируются методы испытаний реального оборудования.

3.7. Метод анализа результатов испытаний на основе имитационного моделирования

Назначение метода. Метод обеспечивает применение цифровых двойников для анализа результатов испытаний бортовой аппаратуры, выполняя сопоставление данных объекта контроля и прецедентов имитационного моделирования.

Область применения. Применяется для испытаний в составе контрольно-проверочной аппаратуры.

Ограничения. Результаты анализа ограничены составом базы знаний имитационной модели.

Описание метода. Анализ испытываемых устройств в общем случае требует исследования функционала $Y=F^o(X)$, устанавливающего соответствие между входными переменными X и выходными переменными Y . Большое число команд и нелинейные алгоритмы их отработки затрудняют определение методик испытаний логики функционирования объекта контроля. Предлагается заменить их на анализ цифровых двойников, выполняя сопоставление с результатами имитационного моделирования [78].

Задача анализа решается следующим образом: входные данные X^i передаются в объект контроля и имитационную модель, результаты моделирования Y^m рассматриваются как эталонные значения для анализа результатов испытаний Y^j . Отправка команд, их получение, квитирование, отработка, изменение параметров приёмо-передающего тракта, а также состояния бортовых систем, работающие комплекты оборудования (основные / резервные) и пр. отображаются в отдельных параметрах телеметрической информации. Для проведения анализа выполнены имитационные эксперименты и построена база прецедентов, которые содержат сценарии передачи команд управления и соответствующие им варианты параметров телеметрии. Сравнение телеметрической информации объекта контроля и имитационной модели позволяет делать вывод о процессах, происходящих в испытываемой системе.

Алгоритм анализа испытаний по базе прецедентов показан на рисунке (Рисунок 37).

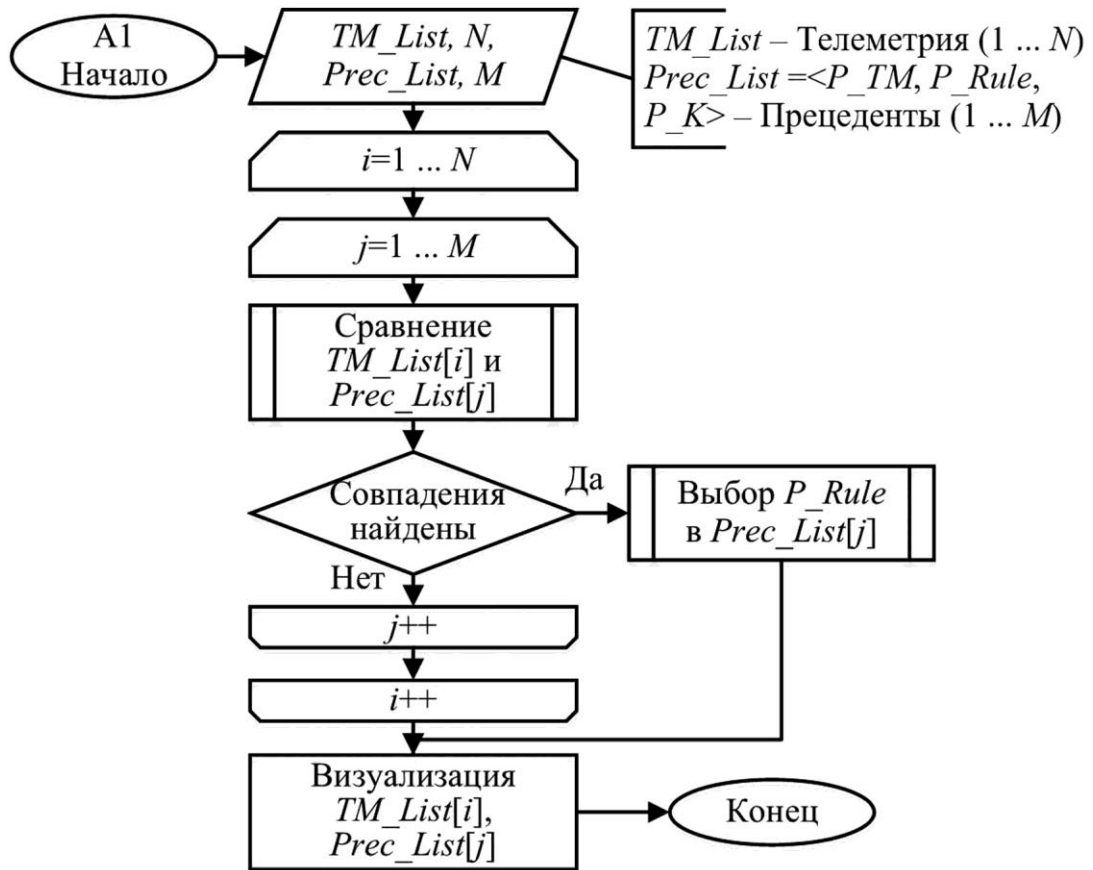


Рисунок 37 – Алгоритм анализа испытаний по базе прецедентов

На начальном этапе работы алгоритма выбираются данные для сравнения и формируются TM_List – множество пакетов телеметрической информации, полученных при испытаниях бортовой аппаратуры, $Prec_List$ – 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, в случае, если прецедент описывает моделирование приема, передачи или обработки команды. Алгоритм выполняет поиск параметров телеметрии для прецедентов в P_TM и их сравнение с телеметрией объекта контроля в TM_List . Совпадение значений параметров свидетельствует о том, что произошли одинаковые события, как в имитационной модели, так и во время испытаний реального оборудования. Изменение состояния модели описывается правилами P_Rule .

Результатом работы алгоритма являются прецеденты модели соответствующие телеметрии бортовых систем и правила базы знаний. Применение правил базы знаний для формирования прецедентов обеспечивает детальное описание дей-

ствий, которые привели к получению тех или иных значений параметров телеметрической информации. В случае, когда выполняется приём и передача команд, то поиск по базе прецедентов может быть ограничен результатами моделирования, полученными при обработке заданной команды.

Алгоритм анализа обработки команды по базе прецедентов приведён на рисунке (Рисунок 38).

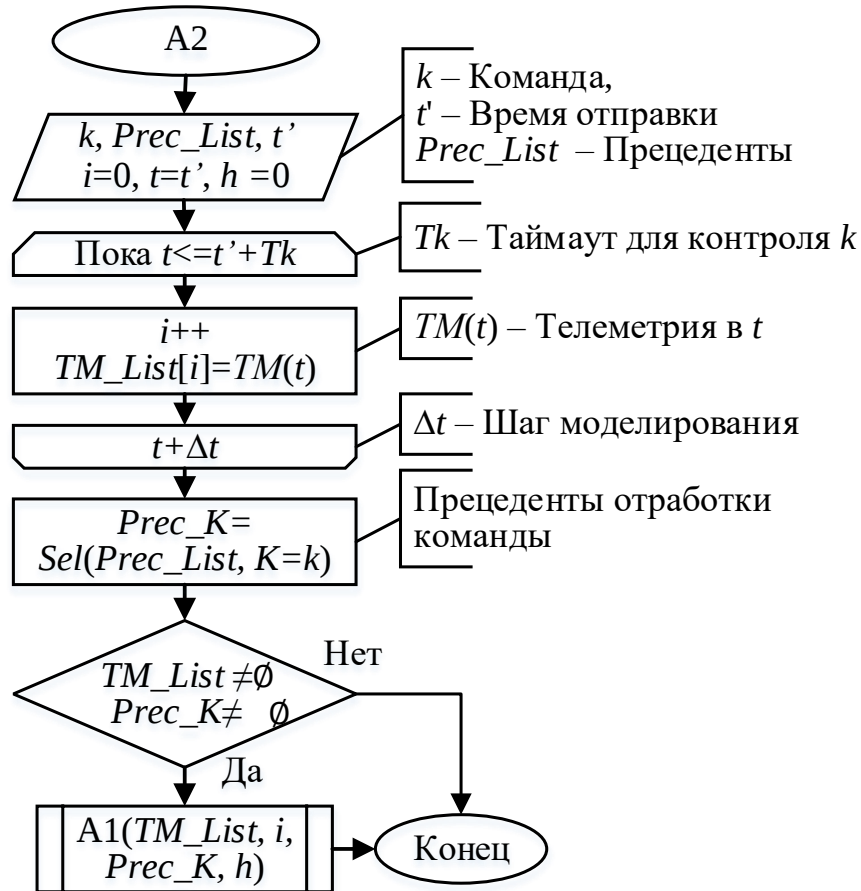


Рисунок 38 – Алгоритм анализа испытаний командно-программного управления

На начальном этапе работы алгоритма выбираются данные для сравнения, формируется список TM_List , содержащий пакеты телеметрической информации, полученных от объекта контроля после отправки команды K за период времени Tk [284]. Из множества прецедентов имитационной модели $Prec_List$ выбираются прецеденты, полученные при моделировании приема, передачи и обработки команды K . Из них формируется множество $Prec_K$. Если построенные множества TM_List и $Prec_K$ не пустые, то выполняется «A1 – Алгоритм анализа испытаний

по базе прецедентов». Новый подход рассматривает все возможные изменения параметров, отражённые в имитационной модели и применяется для различных видов испытаний, вне зависимости от отправляемых в объект контроля команд. Прецедент содержит наборы правил базы знаний, которые выполнялись для его получения, что позволит выявлять особенности работы, не наблюдаемые при анализе отдельных параметров.

Сложность метода зависит от количества сопоставляемых данных телеметрии, полученной при проведении испытаний и прецедентов имитационного моделирования.

$$C_{A1} = |TM_List| \times |Prec_List|,$$

$$C_{A2} = \sum_{k \in K} (|Sel(TM_List, t \in [t', t' + Tk])| + |Sel(Prec_List, k)|).$$

Интерпретация результатов. Применение баз знаний, построенных на основе конструкторских документов и протоколов информационного взаимодействия и входящих в состав цифровых двойников, позволяет специалисту принимать решения о корректности работы исследуемого оборудования.

3.8. Выводы к главе 3

Разработаны новые методы интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем, которые позволяют применять цифровые двойники для подготовки и проведения испытаний: проводить анализ характеристик устройств на программных моделях, формировать методы испытаний реального оборудования, использовать модели в качестве имитаторов, с которыми взаимодействует объект контроля и выполнять анализ результатов испытаний по данным имитационных экспериментов. В отличие от существующих, предложенные методы позволяют формализовать и применять знания специалистов предметной области и имитируют на основе полученных знаний функции бортовых систем при выполнении командно-программного управления космическим аппаратом. Исследование различных особенностей функционирования

бортовых систем позволяет создавать специализированные процедуры испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата.

Новые методы позволяют по-новому выполнять построение сценариев испытаний, поддерживают расширяемость измерительных функций, механизмы повторного использования элементов сценария, взаимодействие с имитаторами бортовых систем, визуализацию и анализ результатов испытаний на основе интеллектуального имитационного моделирования. В отличие от существующих методов, основанных на многократных натурных экспериментах, новые методы упрощают применение моделей для поддержки испытаний.

Выполнена формализация сценарного метода испытаний, определяющая правила порождения испытательных процедур и алгоритмы их интерпретации. Создан метод поддержки проведения комплексных испытаний, обеспечивающий взаимодействие автоматизированного испытательного комплекса с объектом контроля. Метод позволяет выполнять трансляцию испытательных процедур в объект контроля и получаемых от него данных – в автоматизированный испытательный комплекс. Создан метод поддержки испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой. Предложен состав испытательных процедур, включающий перечень команд, правила их передачи и критерии контроля. Разработан метод формирования испытательных процедур на основе базы знаний имитационной модели, входящей в состав базовых компонент цифровых двойников функционирования бортовых систем. Предложен метод анализа испытаний, использующий прецеденты имитационного моделирования для анализа корректности работы исследуемого оборудования. Совместно с методом структурно-графического анализа, выполняющим контроль полноты программ испытаний методы обеспечивают специалиста предметной области специализированными инструментами для всестороннего исследования сложных технических систем.

Разработанные методы позволяют решать задачи цифровой поддержки жизненного цикла бортовых систем в процессах проектирования, разработки и испытаний космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

4.1. Концептуальные принципы построения новой технологии

Для создания научно-обоснованных технологических решений, обеспечивающих повышение эффективности процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры за счёт интеграции интеллектуальных, информационных и графических методов на основе концепции цифровых двойников сформированы концептуальные принципы построения новой технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов [280].

Под термином *Технология* в данном диссертационном исследовании 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. Для создания новой технологии использованы разнообразные инструменты системного анализа, позволяющие составить её описание с необходимым уровнем обобщения и детализации, выполнена унификация методов в составе технологии, исключение дублирования потоков данных и построены графические представления:

1. Графическое описание процессов производства, показывающее задачи цифровой поддержки жизненного цикла бортовых систем и задачи специалиста предметной области.

2. Онтологическое моделирование. Построена онтология новой технологии, объединяющая проблемы поддержки жизненного цикла бортовых систем, задачи и методы их решения в составе новой технологии.

3. Структурно-функциональное моделирование [35]. Разработан иерархически упорядоченный набор диаграмм, представляющих этапы проектирования, разработки, испытаний и методы, необходимые для поддержки каждого этапа.

4. Выбор функциональных характеристик, реализация которых в новой технологии имеет наибольшее значение для поддержки жизненного цикла бортовых систем и решения задач производства специалистами предметной области.

5. Проектирование проблемно-ориентированных программных инструментов для интеллектуального имитационного моделирования бортовых систем – Программно-математической модели бортовой аппаратуры (ПММ) и инструментов анализа функционирования бортовых систем – Программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры (ПО КПА).

Сформулированы требования к новой технологии:

1. Технология должна обеспечить комплексный подход к поддержке жизненного цикла бортовых систем космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников. Это требование является ключевым фактором, создающим предпосылки для успешного выполнения космических проектов;

2. Технология должна обеспечить семантическую преемственность информационных ресурсов и специализированных структур данных от инструментов моделирования к инструментам поддержки испытаний для проектирования и анализа готовых устройств. Это позволит специалисту предметной области моделировать и использовать такие понятия, как телеметрическая информация, команда управления, массив командно-программной информации, разовая команда, квитанция и другие;

3. В состав информационных ресурсов технологии должны войти базы знаний. Что будет способствовать формированию и обмену знаниями между группами инженеров-конструкторов, имеющими большой опыт в различных аспектах решаемых задач;

4. Технология должна предоставить удобные графические инструменты для формирования и применения цифровых двойников: построения и интеграции моделей, проведения имитационных экспериментов, получения данных натурных испытаний и анализа функционирования бортовой аппаратуры. Это требование обеспечит эффективное решение задач, возникающих в работе конструктора бортовой аппаратуры космического аппарата.

5. Технология должна использовать унифицированные и расширяемые инструменты моделирования, построения методик испытаний и анализа данных. Это обеспечит главное условие применения цифровых двойников – функциональную преемственность моделей от этапов проектирования бортовых систем к этапам испытаний изготовленного оборудования.

4.2. Состав методов новой технологии для моделирования и анализа

Технология содержит оригинальные методы интеллектуального моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов для поддержки жизненного цикла бортовых систем при проектировании, разработке, и испытаниях космических аппаратов [154]:

- Метод информационно-графического моделирования, предназначенный для графического построения конфигурации бортовых систем космического аппарата, создания параметров, структур команд, телеметрической информации;
- Метод построения баз знаний, позволяющий формировать правила информационного взаимодействия бортовых систем и интеграции моделей, обеспечивающий взаимодействие с виртуальными приборами;
- Эвристический метод пошагового построения интеллектуальных имитационных моделей, позволяющий выполнять оценку конфигурации модели на основе эвристических критериев;
- Метод интеллектуального имитационного моделирования, расширяющий функционал классической машины логического вывода и позволяющий оперировать с таймерами и специализированными структурами данных;

- Метод моделирования командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата, предназначенный для имитации и визуализации логики функционирования бортовых систем;
- Метод создания базы прецедентов имитационного моделирования, позволяет сохранять результаты работы имитационной модели для анализа и сравнения с результатами испытаний реальных систем.
- Метод формирования правил на основе программ испытаний для автоматического создания правил отработки команд в соответствии с построенными процедурами проведения испытаний.
- Сценарный метод подготовки испытаний, предназначенный для пошагового построения формализованных процедур выполнения измерений или управления оборудованием;
- Метод выполнения сценариев, позволяющий из формализованных описаний сценариев создавать последовательности действий и настроек для вызова программ работы с оборудованием.
- Метод поддержки комплексных испытаний, реализующий механизмы взаимодействия объекта контроля с автоматизированным испытательным комплексом посредством контрольно-проверочной аппаратуры.
- Метод поддержки испытаний командно-программного управления, позволяет создавать испытательные процедуры, содержащие набор команд, настроек их передачи и критериев контроля их прохождения;
- Метод формирования испытательных процедур на основе базы знаний имитационной модели.
- Метод анализа испытаний по прецедентам имитационного моделирования, позволяющий специалисту предметной области принимать решение о соответствии исследуемого оборудования проектным решениям.

4.3. Место новой технологии в задачах поддержки жизненного цикла бортовых систем

Рассмотрены процессы цифровой поддержки жизненного цикла бортовой аппаратуры и выделены задачи, а также необходимые ресурсы, входящие в состав новой технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем (на схеме технология – ТИИМ, Рисунок 39).

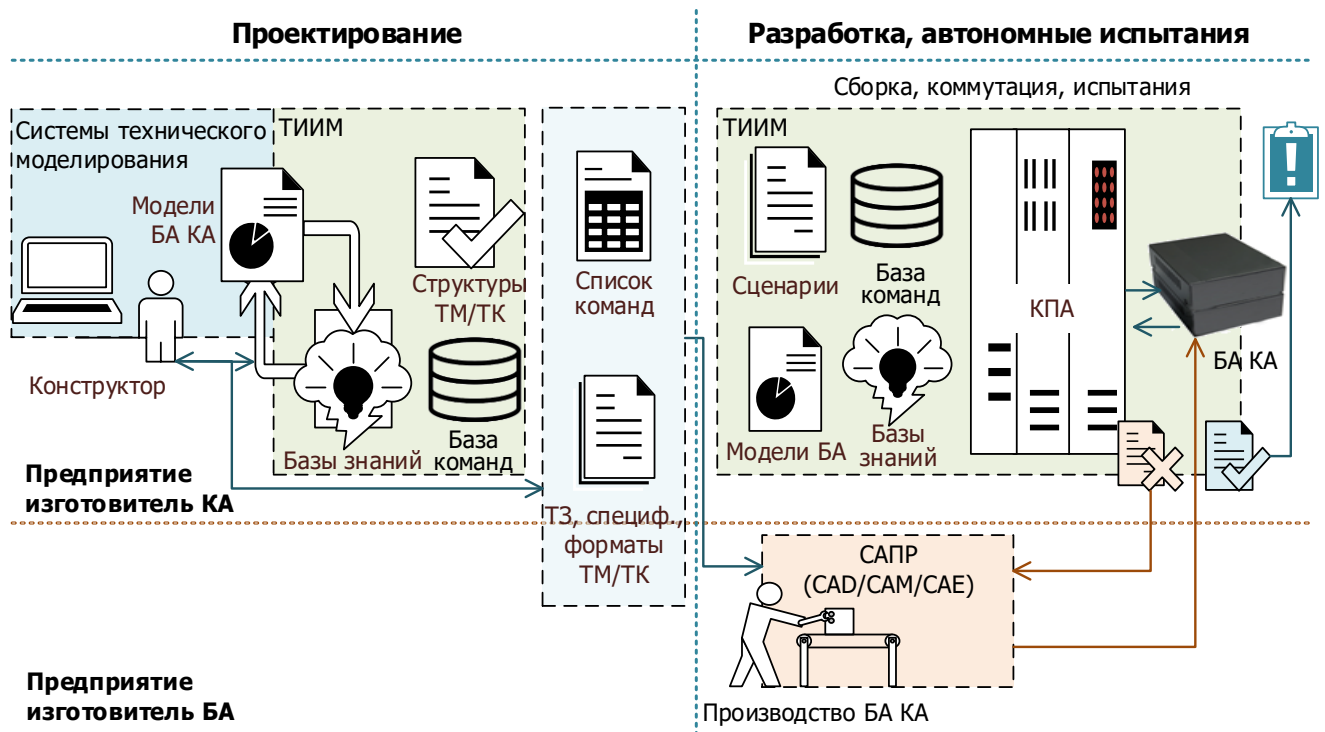


Рисунок 39 – Схема поддержки жизненного цикла бортовой аппаратуры на основе новой технологии

На этапе проектирования бортовых систем новая технология должна строить модели логики функционирования бортовой аппаратуры и поддерживать их интеграцию с моделями, которые могут быть созданы в одной из существующих систем технического моделирования. В составе технологии обязательны инструменты для формирования спецификаций оборудования, структур телеметрической информации и телекоманд (ТМ/ТК) и их проверки, методы создания баз знаний и базы команд. Методы испытаний должны настраиваться на разные объекты контроля и использовать модели имитации режимов работы бортовых систем и логики их взаимодействия с сопряжёнными устройствами. Для исключения дублирования потоков данных необходимо использовать созданные на этапе проектиро-

вания информационные ресурсы для формирования испытательных процедур, проведения испытаний и анализа результатов. Применение такого подхода позволяет на ранних этапах испытаний, до осуществления сборки комплексов систем, выявлять проблемы работы проектируемого и изготавливаемого оборудования и будет способствовать сокращению сроков проведения комплексных испытаний.

Схема организации комплексных испытаний с поддержкой методами новой технологии показана на рисунке (Рисунок 40).

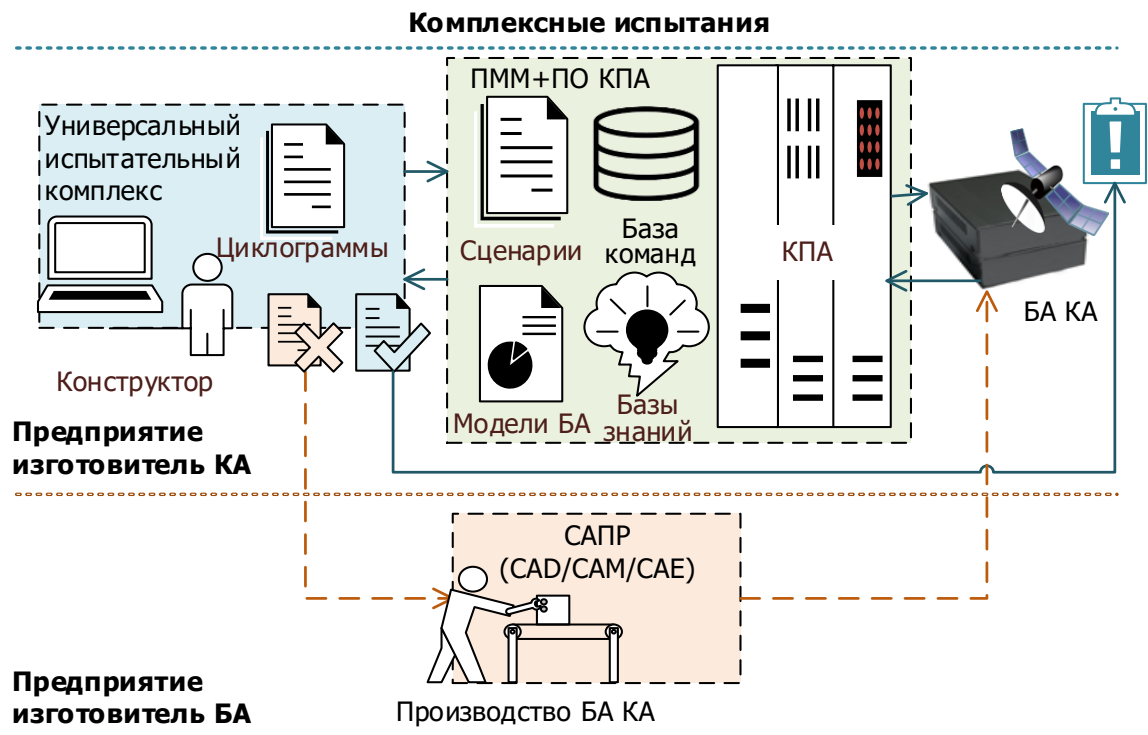


Рисунок 40 – Схема поддержки комплексных испытаний

При проведении комплексных испытаний требуется обеспечить интерфейсы для обмена информацией с информационными системами, используемыми в технологическом процессе, с возможностью миграции команд и структур данных. В составе технологии должны войти методы поддержки взаимодействия с универсальным испытательным комплексом на основе созданных протоколов.

Предложенный подход по дополнению существующей схемы поддержки производства новой технологией на основе интеллектуального имитационного моделирования позволяет интегрировать концепцию цифровых двойников в процессы проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры. Новая технология обеспечит качественные улучшения: сокращение дублирующих функций

и потоков данных, повышение наглядности проектных решений, увеличение оперативности формирования испытательных процедур и раннее обнаружение несоответствий построенного оборудования заданным проектным решениям.

4.4. Онтология поддержки жизненного цикла бортовых систем в составе новой технологии

Построена онтология поддержки жизненного цикла бортовых систем в составе новой технологии (Рисунок 41).

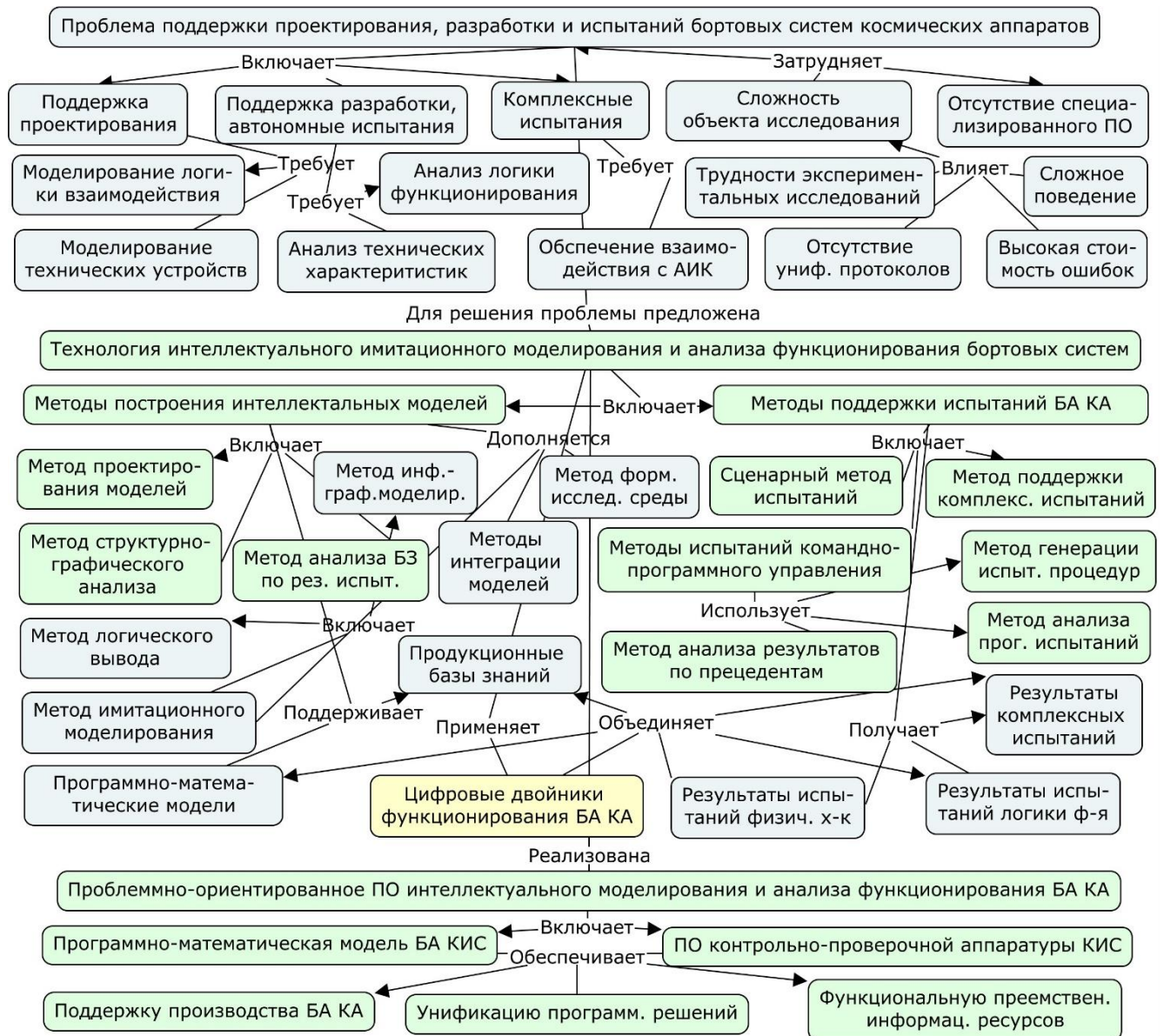


Рисунок 41 – Онтология поддержки жизненного цикла бортовых систем

Онтология показывает проблемы поддержки производства бортовых систем космических аппаратов, задачи и методы их решения. Построение онтологии выполнено в среде концептуального моделирования [135].

Онтология наглядно демонстрирует задачи специалиста предметной области в процессе проектирования, разработки, автономных и комплексных испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата. Выделен состав моделей, методов, инструментов проблемно-ориентированных систем, которые образуют единую программную платформу для решения задач поддержки жизненного цикла бортовых систем.

Новая технология включает как новые методы, так и модификации, и адаптированные реализации существующих методов. Онтология позволила выделить и унифицировать информационные ресурсы, методы и инструментальные средства. Для детализации процессов решения задач разработаны структурно-функциональные диаграммы новой технологии.

4.5. Структурно-функциональный анализ новой технологии

Для описания новой технологии моделирования бортовых систем [140, 157] выполнен структурно-функциональный анализ задач конструктора бортовой аппаратуры в методологии SADT [36, 90]. В нотации IDEF0 – функционального моделирования [238] построена контекстная диаграмма (Рисунок 42), которая (в соответствии с используемой методологией) показывает входные данные, управляющие ресурсы, выходные данные и механизмы исполнения, необходимые для поддержки решения задач проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов. Входы описывают спецификации оборудования и аппаратного обеспечения, управляющие ресурсы – техническая документация (стандарты ESA, CCSDS), методики испытаний, стандарты ТМ/ТК, выходы – модели, пакеты ТМ/ТК, результаты испытаний и их протоколы. В качестве механизмов решения задач в диаграмме выделены программное обеспечение и человеческие ресурсы.

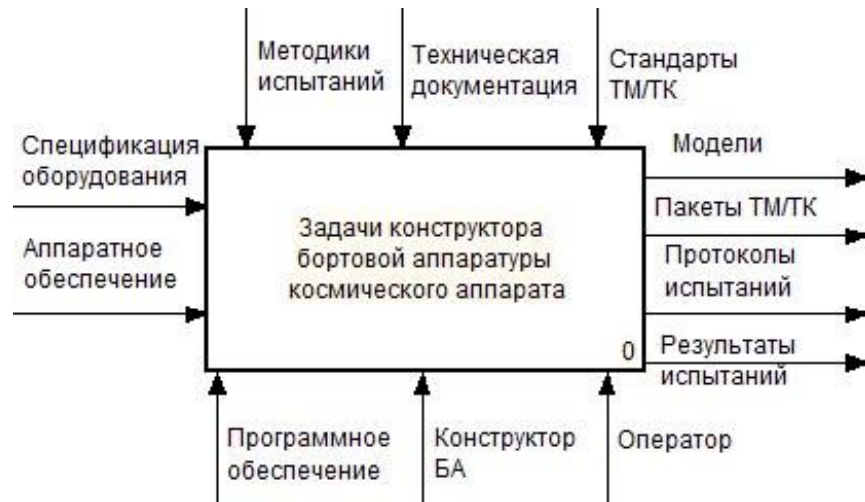


Рисунок 42 – Контекстная диаграмма задач конструктора бортовой аппаратуры

В соответствии с применяемой методологией системного анализа выполнена декомпозиция контекстной диаграммы и построены модели «As-is», описывающие состав задач конструктора бортовой аппаратуры и существующие методы их решения (Рисунок 43).

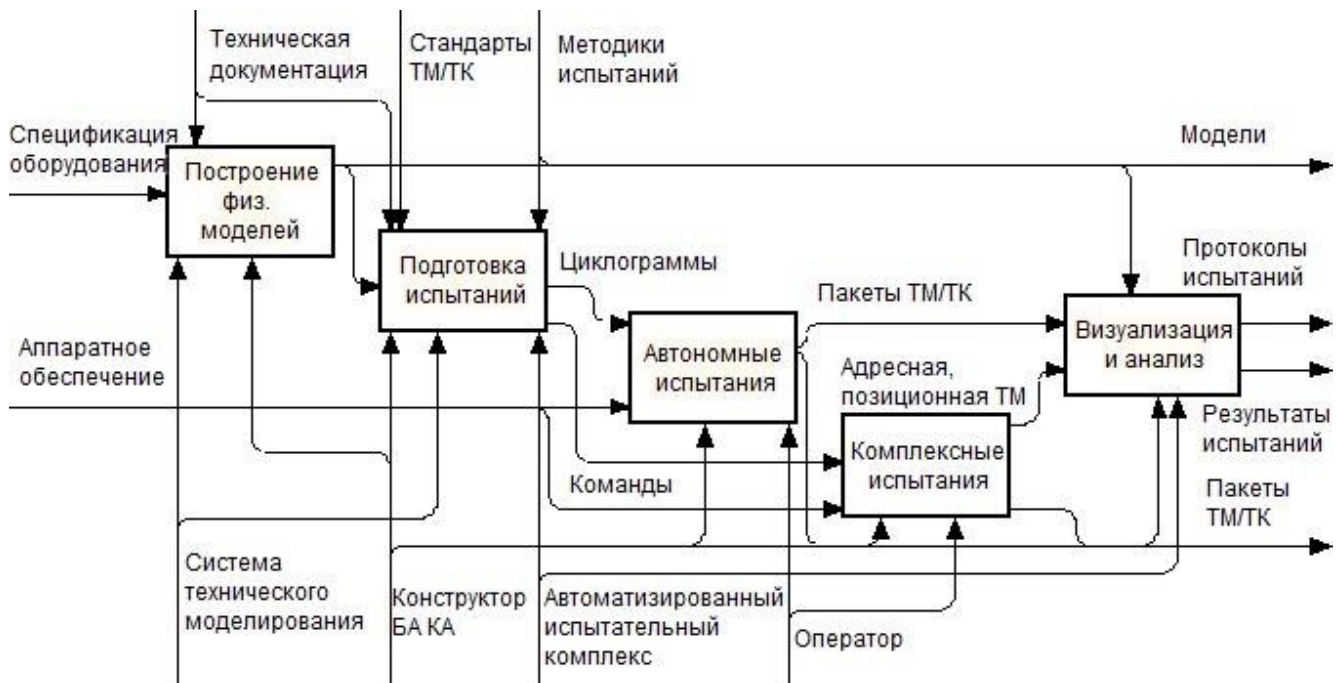


Рисунок 43 – Диаграмма декомпозиции (существующие методы)

Из построенной диаграммы декомпозиции видно, что поддержка конструкторской деятельности не основанная на применении цифровых моделей, ограничена в программных инструментах и, как уже было показано ранее, не обеспечивает комплексного решения всех задач: для поддержки проектирования применя-

ются системы технического моделирования, которые предназначены для исследования физических свойств оборудования, анализ логики функционирования в таких системах не рассматривается; для поддержки испытаний используется автоматизированный испытательный комплекс, возможности которого при проведении автономных испытаний ограничены. Проведённый анализ существующей схемы цифровой поддержки производства показал необходимость её изменения, путём дополнения существующих инструментов новыми инструментами построения и применения цифровых двойников, построенными на основе предложенной технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов. Выполнена декомпозиция контекстной диаграммы в модель «To-be», показывающая детализацию задач и необходимые инструменты для их решения (Рисунок 44). В качестве «управления» в ней выступают стандарты, структуры ТМ/ТК и технические документы. Инструменты, реализующие методы предложенной технологии выступают «механизмами», обеспечивающими решение задач.

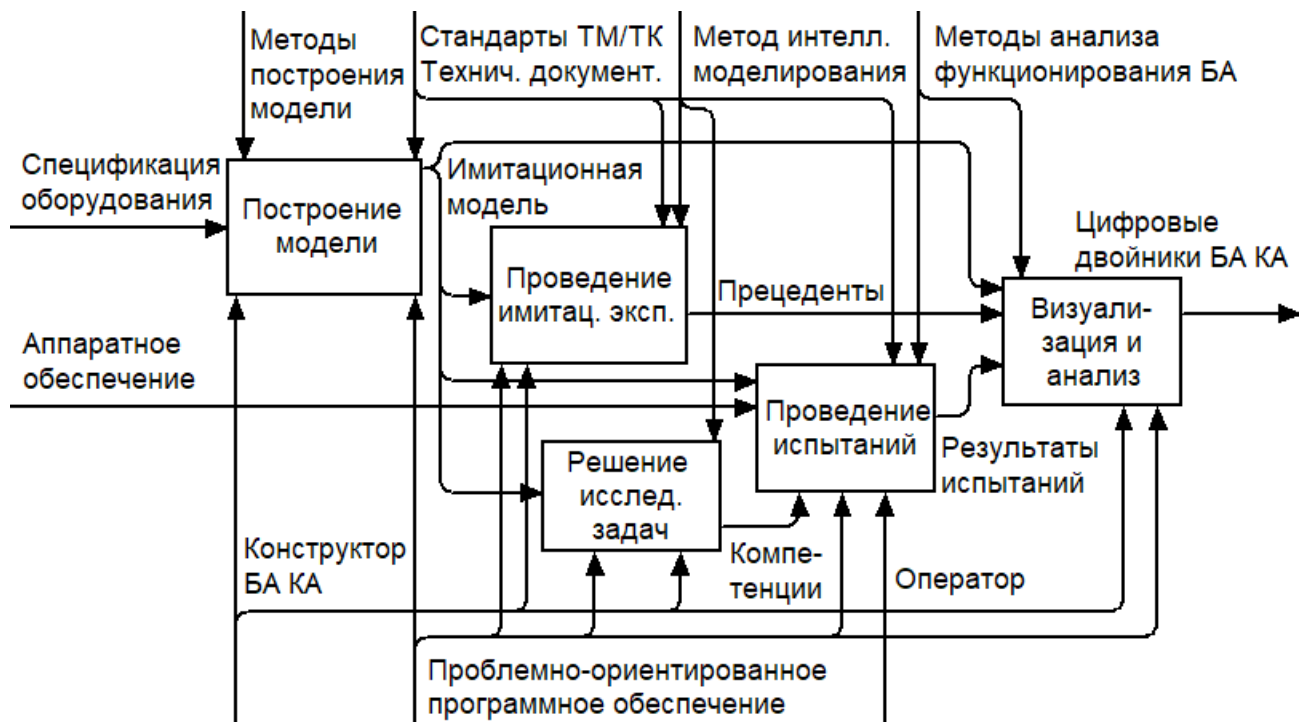


Рисунок 44 –Методы новой технологии

Как видно из диаграммы, задачи конструктора бортовой аппаратуры расширились, новая технология обеспечивает поддержку построения имитационных моделей, проведения имитационных экспериментов, решения исследовательских задач, проведения испытаний, визуализации и анализа результатов [124, 142]. Все новые методы основаны на имитационных моделях функционирования бортовой аппаратуры, что обеспечивает их тесную информационную и функциональную интеграцию.

Выполнена декомпозиция задач, решаемых специалистом предметной области, для которых применимы методы новой технологии. Построены диаграммы декомпозиции второго уровня. Задача «Построение имитационной модели» (Рисунок 45).

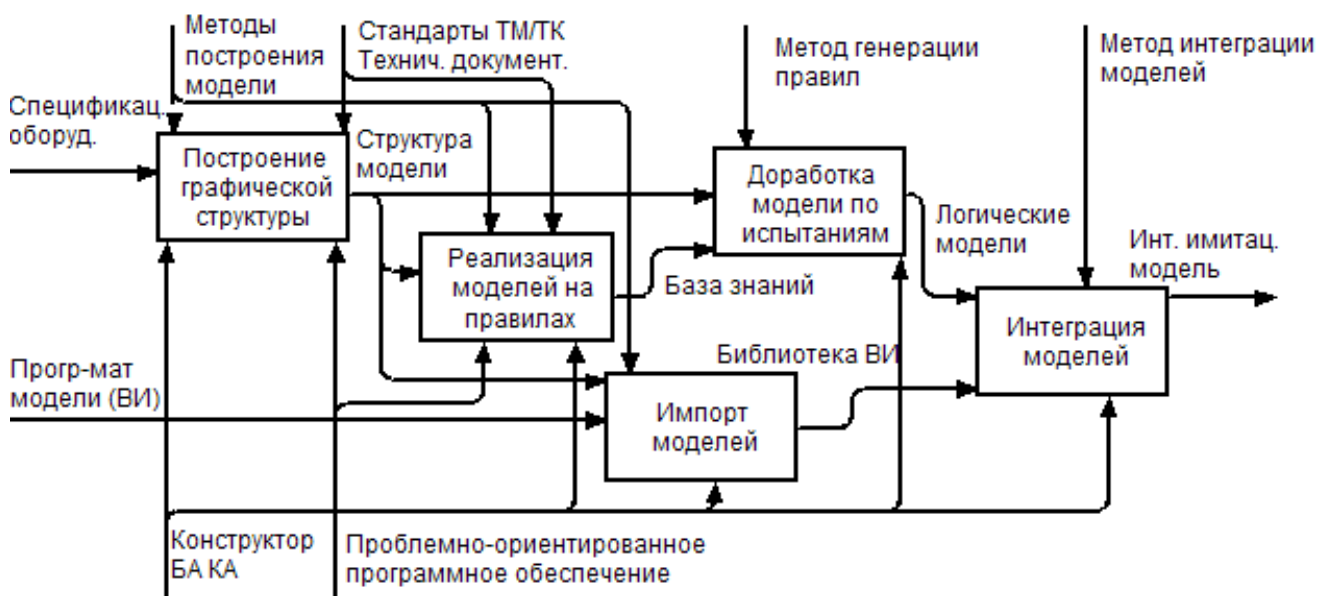


Рисунок 45 – Построение имитационной модели

В задачи построения имитационной модели входит: построение графической структуры, реализация правил функционирования, импорт моделей (построенных в сторонних системах), интеграция моделей, доработка моделей по результатам испытаний [149, 151]. Необходимые методы: информационно-графического моделирования, построения баз знаний, импорта и интеграции моделей, генерации правил на основе испытательных процедур [77, 307].

Задача «Проведение имитационных экспериментов» (Рисунок 46) состоит из подготовки имитационных экспериментов, выполнения моделирования, визуали-

ской среды» – задача использования исследовательской среды специалистами предметной области.

Выполнена дальнейшая декомпозиция каждой из перечисленных задач. Задача «Формирование исследовательской среды» (Рисунок 48). Задача «Применение исследовательской среды» (Рисунок 49) [159].

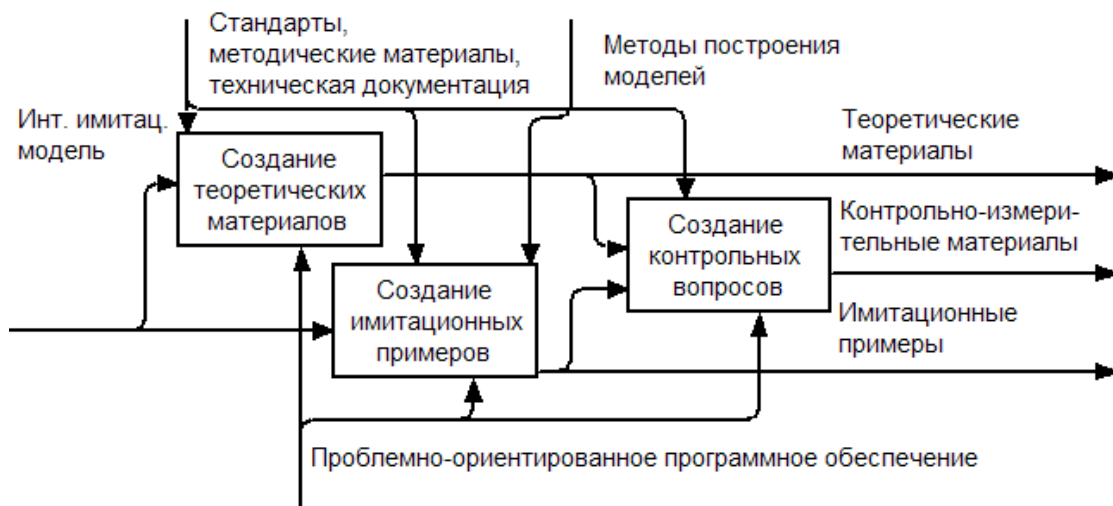


Рисунок 48 – Формирование исследовательской среды

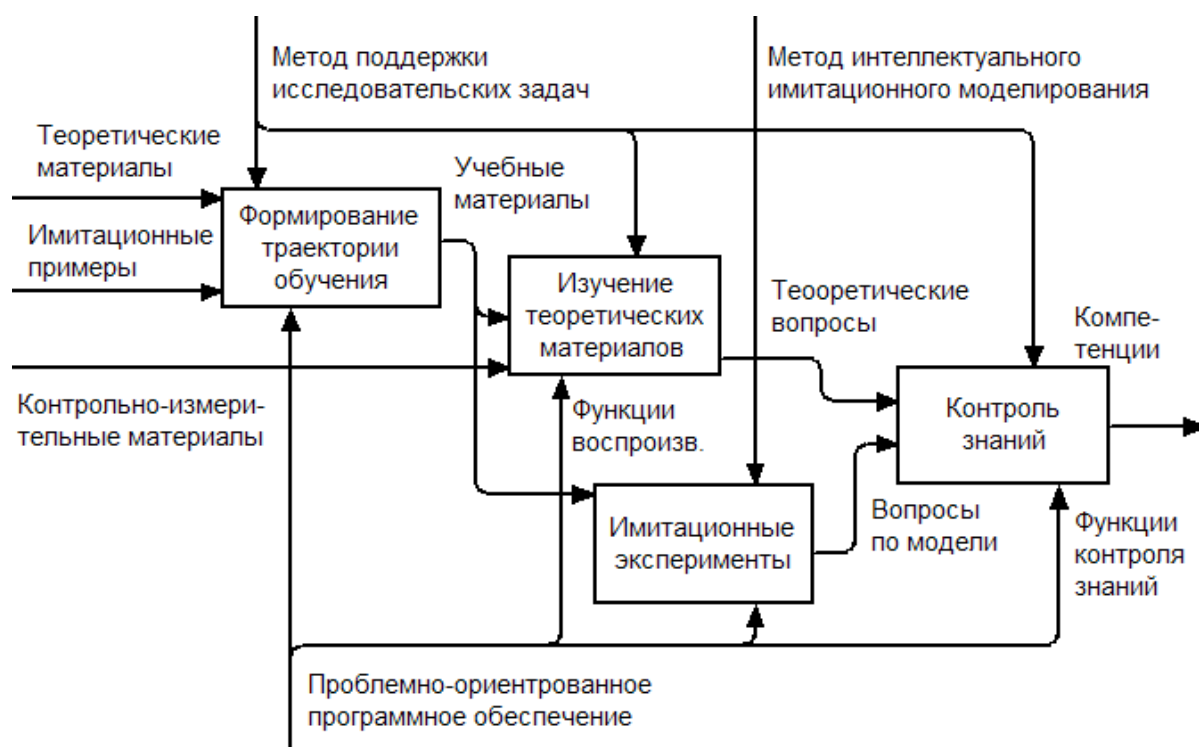


Рисунок 49 – Применение исследовательской среды

Задачи «Формирование исследовательской среды»: создание теоретических материалов, контрольных вопросов и имитационных примеров. Выходные данные составляют информационно-справочные материалы, обеспечивающие проведение исследований и подготовку специалистов предметной области.

Задачи «Применение исследовательской среды»: формирование траекторий обучения, поддержка изучения теоретических материалов, проведения имитационных экспериментов и контроля знаний. Необходимые инструменты: метод персонализации траекторий обучения, функции воспроизведения теоретических материалов, имитационных примеров и функция контроля знаний.

Декомпозиция задачи «Проведение испытаний» (Рисунок 50).

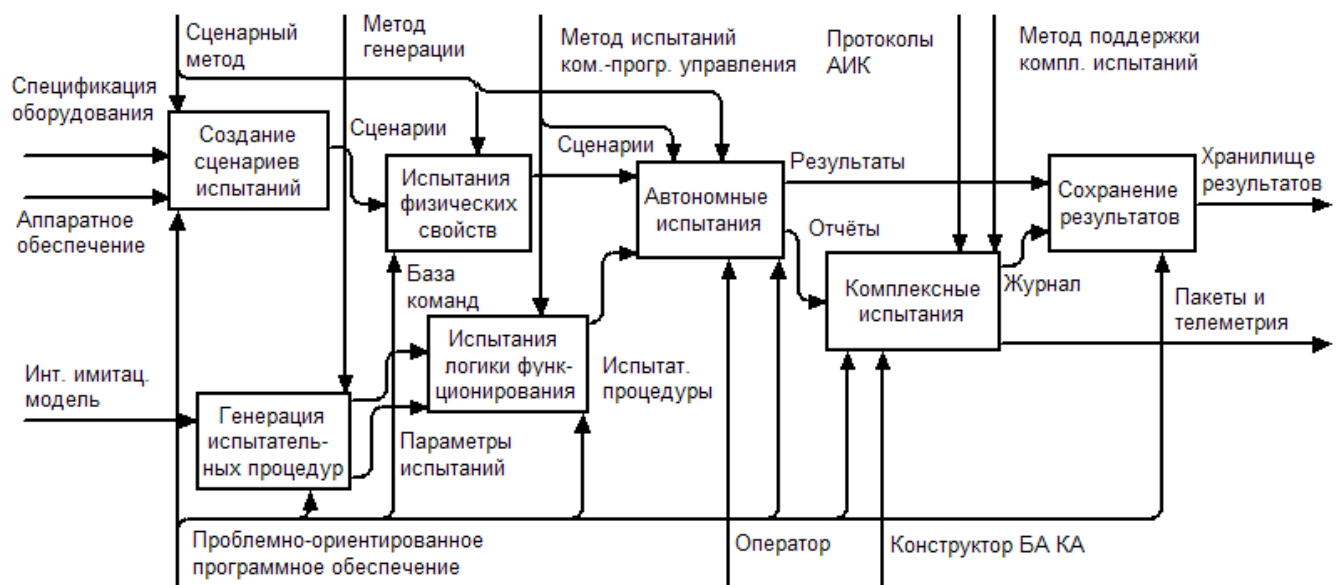


Рисунок 50 – Проведение испытаний

В проведение испытаний входят задачи: создание сценариев испытаний, генерация испытательных процедур, испытания физических свойств и испытания логики функционирования объекта контроля (подготовительные этапы, могут быть сокращены), проведение автономных испытаний, комплексные испытания, сохранение результатов. Методы: сценарный метод подготовки и проведения испытаний [144], метод генерации испытательных процедур, метод испытаний отработки команд (испытаний командно-программного управления БА) [143], метод анализа результатов по прецедентам имитационного моделирования и метод под-

держки комплексных испытаний (взаимодействия с автоматизированным испытательным комплексом).

Выполнена декомпозиция задачи «Создание сценариев испытаний» (Рисунок 51): регистрация программ работы с оборудованием КПА, создание и настройка действий, формирование действий в задании и формирование заданий в сценарии.

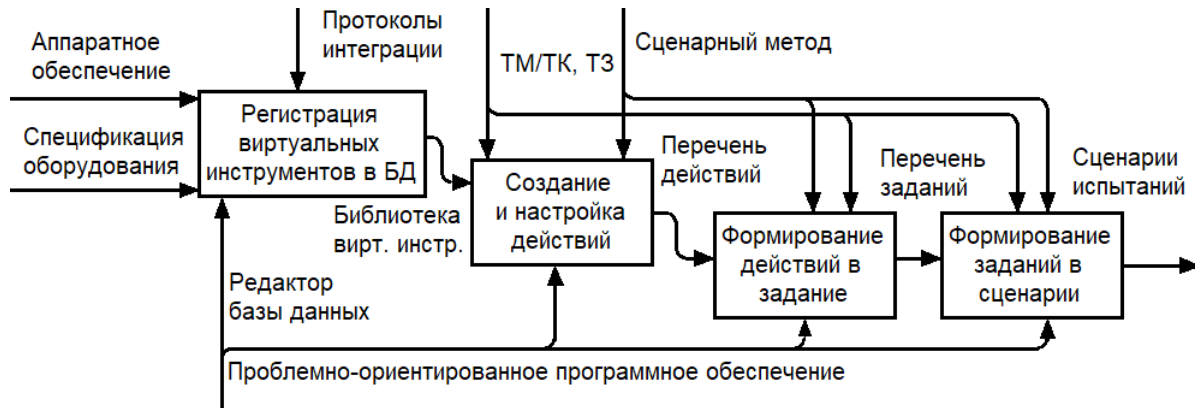


Рисунок 51 – Создание сценариев испытаний

Задачи «Генерация испытательных процедур» (Рисунок 52): выбор команды из базы команд, выбор правил отработки команд (из базы знаний имитационной модели), выбор правил анализа телеметрии, построение зависимых цепочек правил (логический вывод в базе знаний), заполнения параметров, в соответствии с найденными цепочками правил. Выходными данными является база команд и параметры их испытаний.

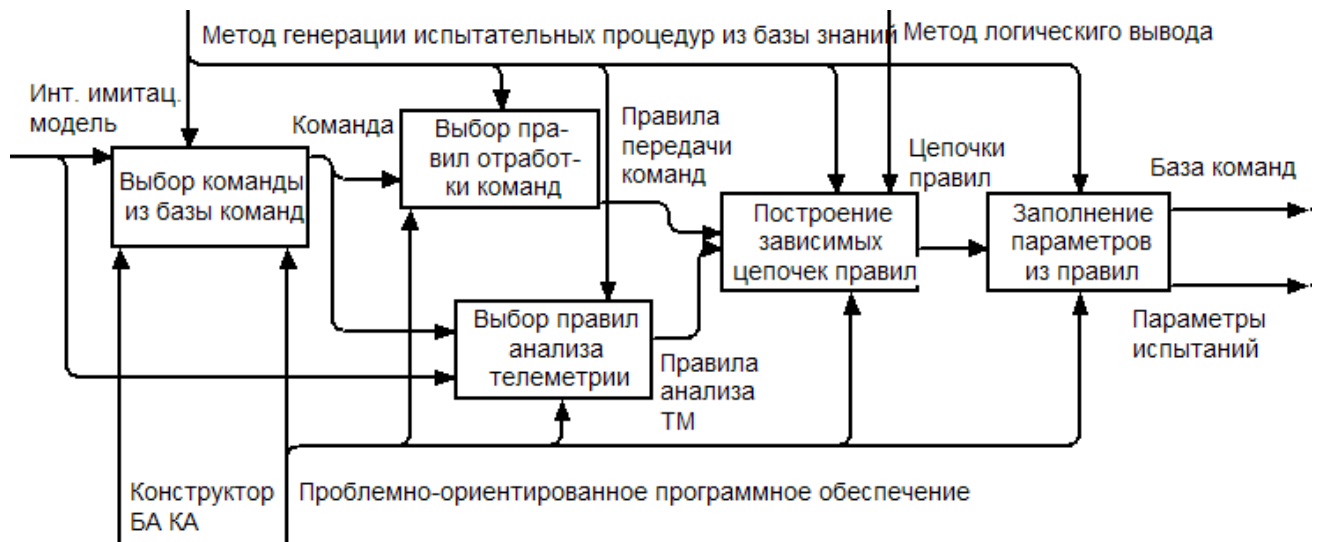


Рисунок 52 – Генерация испытательных процедур

Декомпозиция «Визуализация и анализ» (Рисунок 53).

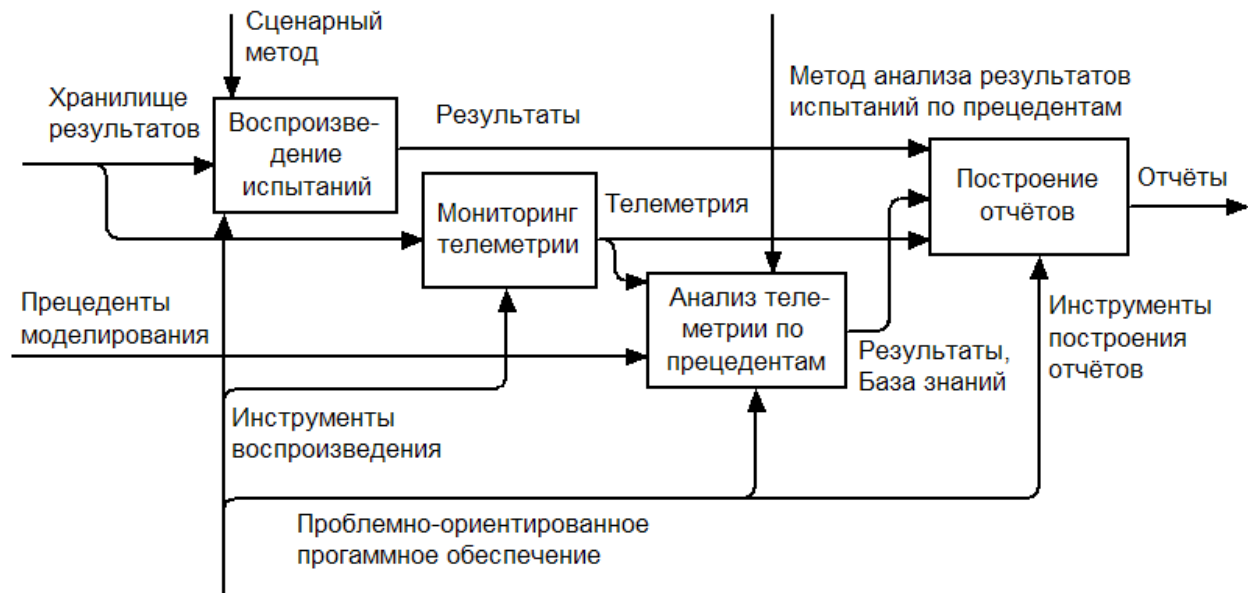


Рисунок 53 – Визуализация и анализ

Для задачи визуализации и анализа необходимо выполнять: воспроизведение результатов испытаний, мониторинг телеметрии, её анализ по прецедентам имитационного моделирования, построение отчётов с результатами испытаний и данными анализа.

Полученная в результате структурно-функционального анализа модель демонстрирует задачи, методы и ресурсы, необходимые для комплексной поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов. Она позволяет объединить потоки данных для организации единого информационного пространства.

Построенные графические представления прошли экспертную проверку специалистами предметной области. На её основе определён состав методов новой технологии, разработана архитектура программного обеспечения и спецификации на функции проблемно-ориентированных систем.

4.6. Проектирование программных инструментов в составе новой технологии

Выполнен выбор и оценка функциональных характеристик, реализация которых в новой технологии позволит обеспечить эффективную поддержку жизненного цикла бортовых систем и решение задач специалистов предметной области при производстве космических аппаратов [164]. Список исследуемых характеристик построен на основе ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 (ISO/IEC 25010:2011), технических заданий на разработку программного обеспечения и критериев, заданных экспертами предметной области. Выбор предпочтений осуществлялся с помощью построения матрицы попарных сравнений критериев методом анализа иерархий Т. Саати [201], оценивающих влияние функциональных характеристик на процессы проектирования, разработки и испытаний.

Для построения матрицы попарных сравнений на первом шаге рассмотрен вклад отдельных этапов производства в задачу «Эффективной поддержки», на втором – функциональные характеристики и их влияние на каждом из этапов. Рассмотрены характеристики: функциональность (способность выполнять заданный набор действий); комплексность (применимость единых подходов, моделей и данных для различных задач); автоматизируемость (снижение трудовых затрат и времени операций); информативность (обеспечение информационной достаточности, ведение архивов данных, отчётов, журналов); гибкость (модифицируемость, расширяемость); конструктивность (получение новых функций); формализуемость (структурируемость); интероперабельность (совместимость с существующим ПО предприятия); эргономичность (минимизация усилий в достижении результата, удобство работы); наглядность (наличие визуальных графических инструментов); ясность (чёткость); сопровождаемость (простота настройки, тестирования, обслуживания, наличие обучающих материалов) и др.

Выполнена процедура парных сравнений, результатом которой является обратно симметричные матрицы $A^k = \{a_{ij}^k\}$, где $k = [1, 3]$, 1- задачи поддержки проектирования, 2- разработки и автономных испытаний, 3 - комплексных испыта-

ний, $i, j = [1, n]$, n - число критериев (размерность матрицы), a_{ij}^k - интенсивность проявления элемента иерархии i относительно элемента j по шкале отношений: 1 – равный вклад; 3 – небольшое преимущество (недостаток) одного над другим; 5 – преимущество (недостаток); 7 – значительное преимущество (недостаток); 9 – принципиальное преимущество (недостаток) и промежуточные значения – 2, 4, 6, 8. Причём, $a_{ji}^k = 1/a_{ij}^k$, $a_{ii}^k = 1$. Методика анализа матриц заключается в её нормировке по формуле $A_{ij}^k = a_{ij}^k / S_j$, где $S_j = \sum_i a_{ij}^k$. Полученные значения задают веса критериев относительно поставленной цели. На основе парных сравнений рассчитываются коэффициенты значимости. Расчёт сводится к вычислению главного собственного вектора матрицы попарного сравнения и его нормализации. Индекс согласованности рассчитывается по формуле $ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$, где λ_{max} – максимальное собственное значение матрицы. Для определения степени согласованности данных вычисляется отношение согласованности (ОС) путём деления значения ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка. Отношение согласованности показывает, что чем ближе максимальное собственное число матрицы к размерности матрицы, тем более она согласована, значения $> 0,1$ считается неприемлемым. Рассмотрены оценки вклада характеристик в задачи эффективной поддержки (Таблицы 2-4).

Таблица 2 – Матрица сравнений критериев для поддержки проектирования

Проектирование		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Вектор приоритета	%
1	Функциональность	1	4	9	5	2	4	8	3	6	0,3	30%
2	Комплексность	1/4	1	5	2	1/4	1/2	4	1/3	3	0,079	7,9%
3	Информативность	1/5	1/2	4	1	1/4	1/3	3	1/4	2	0,056	5,6%
4	Гибкость	1/2	4	7	4	1	2	6	2	6	0,21	21%
5	Интероперабельность	1/4	2	6	3	1/2	1	3	1	4	0,12	12%
6	Эргономичность	1/8	1/4	3	1/3	1/6	1/3	1	1/6	1/2	0,029	2,9%
7	Наглядность	1/3	3	7	4	1/2	1	6	1	5	0,15	15%
8	Сопровождаемость	1/6	1/3	3	1/2	1/6	1/4	2	1/5	1	0,038	3,8%
ИС = 0,0562; ОС = 0,0388												

Таблица 3 – Матрица сравнений критериев для разработки и испытаний

Разработка и автономные испытания		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Вектор приоритета	%
1	Функциональность	1	1/2	1/3	2	3	7	6	4	5	0,16	16%
2	Комплексность	2	1	1/2	3	4	7	6	5	6	0,223	22,3%
3	Автоматизируемость	3	2	1	4	5	8	7	6	5	0,297	29,7%
4	Информативность	1/2	1/3	1/4	1	2	6	5	3	4	0,112	11,2%
5	Эргономичность	1/6	1/6	1/7	1/5	1/4	1	1	1/3	1/2	0,024	2,4%
6	Наглядность	1/4	1/5	1/6	1/3	1	3	3	1	2	0,055	5,5%
7	Сопровождаемость	1/5	1/6	1/5	1/4	1/3	2	2	1/2	1	0,036	3,6%
ИС = 0,0512; ОС = 0,0353												

Таблица 4 – Матрица сравнений критериев для комплексных испытаний

Комплексные испытания		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Вектор приоритета	%
1	Функциональность	1	1/2	5	3	7	1/3	4	3	2	0,155	15,5%
2	Комплексность	2	1	6	2	7	1/2	5	4	3	0,2	20%
3	Автоматизируемость	1/5	1/6	1	1/4	3	1/7	2	1/2	1/3	0,038	3,8%
4	Информативность	1/3	1/2	4	1	6	1/3	4	3	2	0,117	11,7%
5	Интероперабельность	3	2	7	3	8	1	7	5	4	0,3	30%
6	Наглядность	1/3	1/4	2	1/3	3	1/5	2	1	1/2	0,054	5,4%
7	Сопровождаемость	1/2	1/3	3	1/2	4	1/4	3	2	1	0,083	8,3%
ИС = 0,0455; ОС = 0,0314												

Наибольший вес среди всех критериев получили: функциональность (30%), автоматизируемость (29%), комплексность (20%) и интероперабельность (30%). Расчёт отношения согласованности свидетельствует о хорошей согласованности полученных оценок.

Результатом проведённого анализа стал набор функциональных характеристик, включение которых в реализацию новой технологии по мнению экспертов - специалистов предметной области вносит наибольший вклад в обеспечение эффективной поддержки производства ботовых систем космических аппаратов. На этапе проектирования существенное значение имеют такие характеристики, как функциональность, гибкость и наглядность; на этапе разработки и автономных испытаний – автоматизируемость, комплексность, функциональность; на этапе

комплексных испытаний – интероперабельность, комплексность, информативность, функциональность.

Выявленные функциональные характеристики учтены при проектировании проблемно-ориентированных программных систем: «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» (ПММ БА КИС) [198] и «Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» (ПО КПА КИС) [196]. Схема распределения основных функциональных подсистем в проблемно-ориентированных системах показана на рисунке (Рисунок 54). Подсистемы объединяются унифицированными технологическими решениями и общими информационным пространством [150, 158].

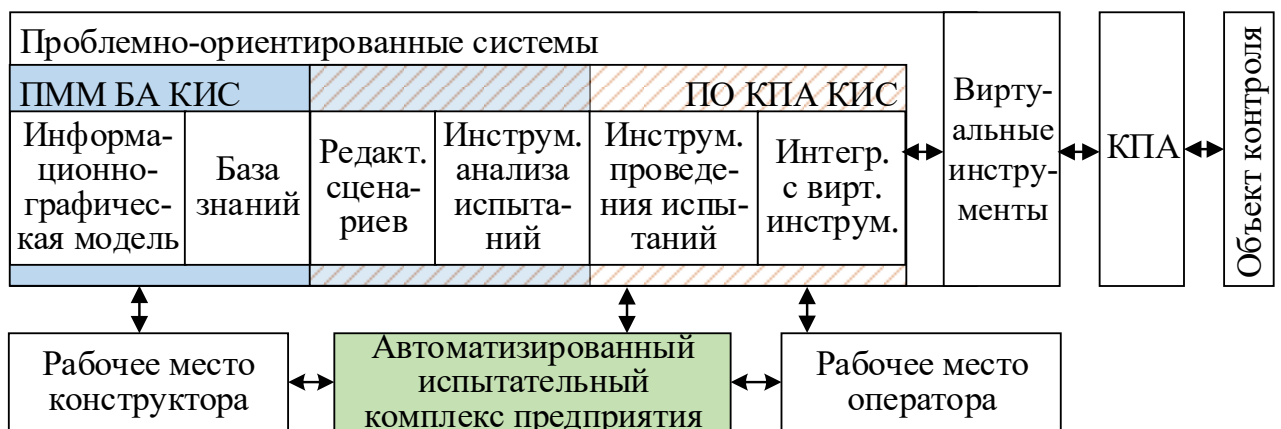


Рисунок 54 – Схема распределения функциональных подсистем

Проблемно-ориентированная система ПММ БА КИС [199] предназначена для рабочих мест (РМ) конструкторов бортовой аппаратуры и включает методы моделирования функций бортовой аппаратуры, проведения имитационных экспериментов, подготовки испытаний оборудования, просмотра и анализа их результатов, построения отчётов. Программное обеспечение КПА КИС [200] предназначено для программно-аппаратного комплекса контрольно-проверочной аппаратуры (КПА), представляющего собой взаимосвязанное измерительное оборудование для проведения высоко- и низкочастотных испытаний и библиотеки измерительных программ. Оно должно включать обеспечивать рабочее место операторов по

проведению испытаний. Для взаимодействия программных подсистем и синхронизации информационных ресурсов выполнено проектирование оперативных баз данных и хранилища результатов испытаний.

Каждая функциональная подсистема представляет расширенные возможности применения концепции цифровых двойников для решения задач моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Реализация проблемно-ориентированных подсистем на основе интеллектуальной имитационной модели обеспечит инструменты изучения принципов и особенностей работы бортовой аппаратуры в условиях, приближенных к реальным. Разработана архитектура программного обеспечения, учитывающая разнотипность измерительного оборудования и методик испытаний, необходимость расширения функций и набора исследуемых величин, изменяемость плана проведения испытаний. Предложены эргономичные графические интерфейсы для создания сценариев испытаний в виде последовательности действий на основе заданного набора команд и параметров оборудования, их выполнения, управления оборудованием КПА, анализа параметров функционирования бортовой аппаратуры, контроля граничных условий и пр. Выполнено проектирование инструментов, обеспечивающих программную управляемость процессов проведения испытаний, оперативное изменение параметров работы оборудования или алгоритмов испытаний в зависимости от задач или результатов анализа. Предложены инструменты испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой на основе модели имитации функционирования бортовых систем. Выполнено проектирование инструментов поддержки проведения комплексных испытаний, обеспечивающих обмен с АИК транспортными пакетами, их обработка, квитирование, формирование команд для КПА и объекта контроля, подготовку и передачу в АИК телеметрической информации на основе данных объекта контроля и параметров КПА. Предложены способы визуализации моделей, имитационных экспериментов, испытательных процедур, контрольных точек, результатов измерений, передаваемых и принимаемых пакетов данных. Разработаны подходы к построению отчётов

на основе исходных данных, сценариев работы, наборов команд и наблюдаемых параметров.

4.7. Выводы к главе 4

Впервые предложена технология, обеспечивающая повышение эффективности процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов за счёт интеграции интеллектуальных, информационных и графических методов на основе концепции цифровых двойников. Технология представляет собой комплекс взаимосвязанных задач, подходов, методов и инструментов их решения и обеспечивает построение и применение цифровых двойников для поддержки специалистов предметной области. 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.

Выполнено графическое описание процессов производства, показывающее задачи цифровой поддержки жизненного цикла бортовых систем. Показана необходимость объединения баз знаний, программно-математических моделей и данных натурных испытаний для цифровой поддержки задач, возникающих в деятельности конструктора бортовой аппаратуры.

Построена онтология, объединяющая проблемы поддержки жизненного цикла бортовых систем, задачи и методы их решения в составе новой технологии. Онтология позволила выделить и унифицировать информационные ресурсы и инструментальные средства решения задач и исключить дублирование потоков данных.

Выполнено структурно-функциональное моделирование, результатом которого стал иерархически упорядоченный набор диаграмм, представляющих этапы проектирования, разработки, испытаний и методы, необходимые для поддержки каждого этапа.

Сформулированы требования к новой технологии, показано, что необходимы комплексный подход к поддержке жизненного цикла бортовых систем на основе

концепции цифровых двойников, обеспечение семантической преемственности информационных ресурсов и специализированных структур данных от инструментов моделирования к инструментам поддержки испытаний, применение унифицированных и расширяемых инструментов моделирования, построения методик испытаний и анализа результатов натурных испытаний.

Выделены функциональные характеристики, которые позволяют обеспечить такие качественные улучшения, как повышение наглядности проектных решений, увеличение оперативности формирования испытательных процедур и раннее обнаружение несоответствий построенного оборудования заданным проектным решениям.

Технология прошла апробацию и внедрена для поддержки производства бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата в АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва». Результатом её применения стали проблемно-ориентированные системы: ПММ БА КИС для моделирования функций бортовой аппаратуры, проведения имитационных экспериментов, подготовки испытаний оборудования, просмотра и анализа их результатов, построения отчётов и ПО КПА КИС для проведения испытаний посредством контрольно-проверочной аппаратуры.

ГЛАВА 5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

5.1. Назначение и состав системы интеллектуального имитационного моделирования

Выполнено проектирование проблемно-ориентированной системы ПММ БА КИС [152, 153], предназначенной для построения и применения цифровых двойников в процессах производства бортовой аппаратуры. Технологией, обеспечивающей использование цифровых двойников, является новая технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем, которая объединяет базовые компоненты цифровых двойников: базы знаний, программно-математические модели технических систем и результаты натурных испытаний.

Предложены программные инструменты имитационного моделирования [171, 217]: подсистема ведения баз данных; подсистема построения графической модели БА КИС; редактор пакетов данных; редактор правил функционирования модели; подсистема формирования правил; инструменты структурно-графического анализа имитационной модели; подсистема интеграции с виртуальными инструментами; подсистема имитационного моделирования. Инструменты формирования исследовательской среды: подсистема редактирования справочных (учебных) материалов; подсистема интеграции с имитационной моделью; подсистема визуализации материалов.

На основе системного подхода создана спецификация на автоматизируемые функции [82, 207] (Таблица 5).

Таблица 5 – Автоматизируемые функции поддержки моделирования

№	Наименование подсистемы	Автоматизируемые функции	Результаты работы
1.	Подсистема ведения баз данных	Обеспечение взаимодействия всех подсистем на основе баз данных.	1. База моделей. 2. База учебных материалов.

№	Наименование подсистемы	Автоматизируемые функции	Результаты работы
2.	Подсистема построения графической модели БА КИС	1. Создание графической модели БА КИС. 2. Задание коммутационных интерфейсов для элементов модели. 3. Конфигурация коммутационных связей модели для моделирования информационного взаимодействия.	1. Графическая модель БА КИС. 2. Структурное описание конфигурации модели.
3.	Редактор пакетов данных	1. Создание пакетов данных для команд РК_{КИС}, РК_{БУ БКУ}, квитанций, пакетов телеметрической информации. 2. Создание пакета данных. 3. Заполнение пакетов. 4. Генерация полей в пакетах.	1. Структуры пакетов команд. 2. Структуры телеметрии 3. База команд.
4.	Редактор правил функционирования модели	1. Создание переменных для элементов модели. 2. Задание таймеров для управления процессом моделирования. 3. Формирование базы знаний, содержащей правила функционирования КИС и передачи пакетов данных на основе коммутационных интерфейсов, переменных и таймеров.	1. База правил, описывающая работу БА КИС. 2. База данных с набором характеристик КИС. 3. Переменные для управления имитационным моделированием.
5.	Подсистема формирования правил	1. Генерация правил приёма-передачи команд. 2. Генерация правил контроля параметров телеметрии.	Правила базы знаний.
6.	Инструменты структурно-графического анализа имитационной модели	1. Построение показателей оценки качества имитационной модели. 2. Визуализация построенных показателей в инфографике.	Графические отображения.
7.	Подсистема интеграции с виртуальными инструментами	1. Обеспечение взаимодействия с программами из библиотеки виртуальных инструментов.	Расчётные параметры.
8.	Подсистема имитационного моделирования	1. Имитационное моделирование функционирования БА КИС в автоматическом и пошаговом режимах. 2. Имитация поведения БА КИС при прохождении пакетов команд и телеметрии, изменении значений переменных для элементов модели. 3. Визуализация графической модели КИС с эффектом анимации. 4. Ведение и визуализация протокола имитационного моделирования. 5. Формирование отчётов по результатам имитационного моделирования.	1. Графическая визуализация функционирования модели. 2. Протоколы имитационного моделирования. 3. Отчёт с результатами имитационного моделирования.

№	Наименование подсистемы	Автоматизируемые функции	Результаты работы
9.	Подсистема редактирования учебных материалов	1. Поддержка создания и редактирования учебных материалов. 2. Поддержка создания примеров имитационного моделирования. 3. Формирование тематического тезауруса. 4. Поддержка создания контрольных материалов.	1. Информационно-справочное наполнение. 2. Контрольные материалы.
10.	Подсистема интеграции с имитационной моделью	1. Создание имитационных примеров функционирования бортовой аппаратуры. 2. Отображение примеров и исследовательских задач.	Примеры работы БА КИС.
11.	Подсистема визуализации материалов	1. Организация интерактивного изучения материала. 2. Имитационное моделирование примеров функционирования БА КИС. 3. Поддержка функций контроля знаний.	Визуальное представление исследовательских задач.

Предложенная спецификация обеспечила решение системной проблемы, исключение дублирующих функций и потоков данных и обеспечила построение цифровых двойников функционирования бортовой аппаратуры.

5.2. Построение информационно-графической модели бортовой аппаратуры космического аппарата

Предложены инструменты информационно-графического моделирования, предназначенные для построения моделей технических устройств [156, 162]. Модель представляет собой графическое описание бортовой аппаратуры, её составных частей и их взаимных связей (Рисунок 55). Степень детализации модели определяется целью моделирования. Инструменты информационно-графического моделирования [55] позволяют создавать конфигурацию бортовых систем, задавать резервирование блоков, определять коммутационные интерфейсы, вводить характеристики и параметры функционирования оборудования. Результатом работы является множество $G = \langle B, I, C, D, P \rangle$, определяющее элементы имитационной модели.

Предлагается графическая визуализация элементов модели, для каждого элемента $B_i = \langle N_i, E_i, I^i, X^i, Y^i \rangle$ ($i = [1, \dots, |B|]$, $|B|$ – количество элементов модели) со-

здаётся графический блок, в котором в наглядном виде представляются интерфейсы, их свойства и параметры элемента.

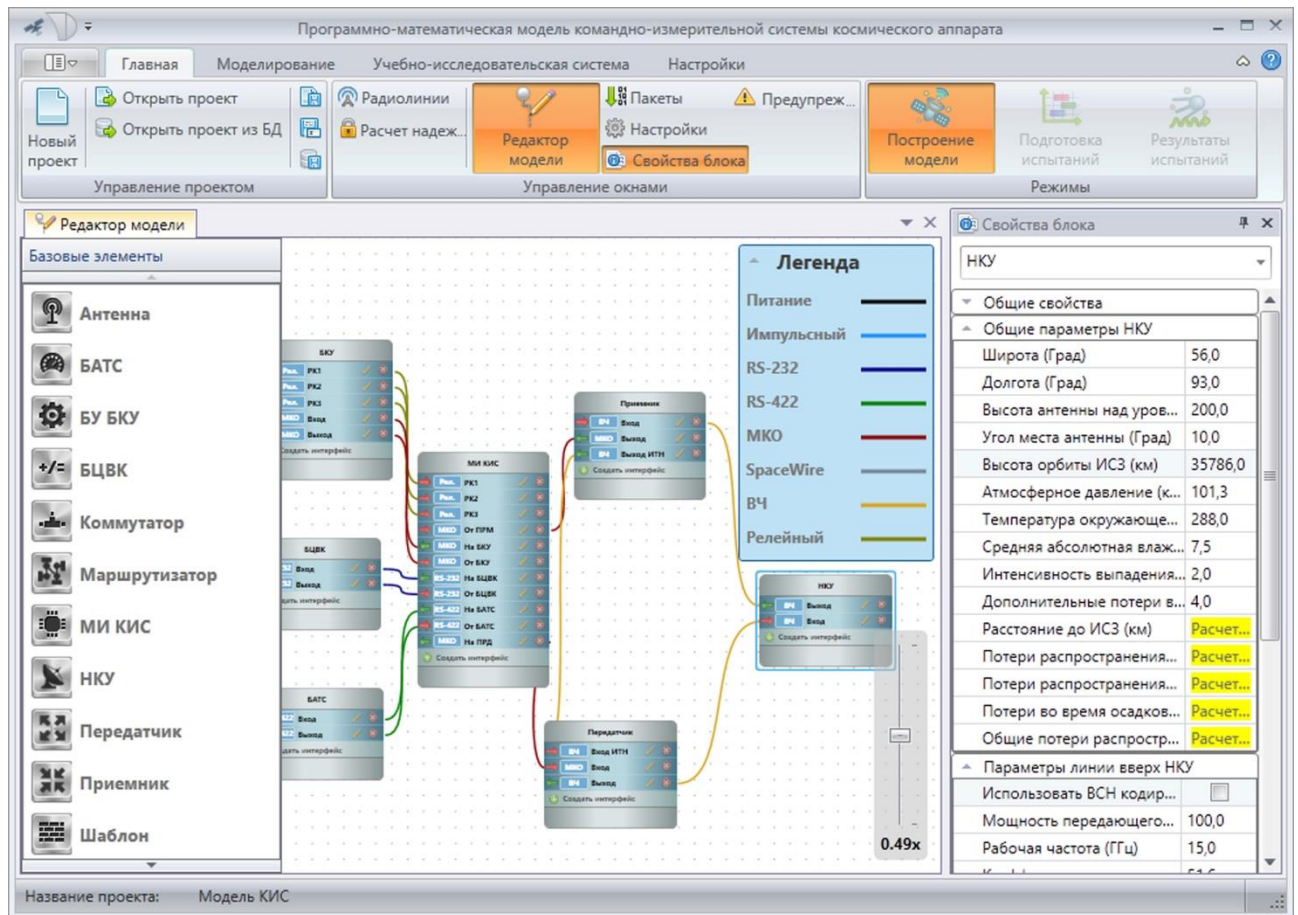


Рисунок 55 – Инструменты информационно-графического моделирования

Предложены инструменты контроля коммутационных соединений между интерфейсами элементов модели. Соединение $C_{12} \in B_1 \times B_2$ двух элементов модели B_1 и B_2 по коммутационному интерфейсу $I_1^1 \in B_1$ и $I_2^1 \in B_2$ допустимо, если $Tr(I_1^1) = Tr(I_2^1)$ и $Rt(I_1^1) \neq Rt(I_2^1)$. Графически показаны допустимые соединения $Tr(I_1^1) = Tr(I_2^1)$ и/или $Rt(I_1^1) \neq Rt(I_2^1)$ и недопустимые – $Tr(I_1^1) \neq Tr(I_2^1)$ и/или $Rt(I_1^1) = Rt(I_2^1)$.

Созданы множества P – переменных модели входят параметры, построенные на основе стандартных типов данных из D и пакеты команд и телеметрии, имеющие специализированные типы данных: $D^k \in D$ – структуры для пакетов данных команд, $D^t \in D$ – структуры для пакетов телеметрической информации. Повторя-

ющиеся процессы ожидания или выполнение операций, отложенных во времени, моделируется таймерами.

5.3. Формирование структур и пакетов данных

Предлагается инструмент формирования пакетов команд и телеметрии – «Редактор пакетов данных» (Рисунок 56).

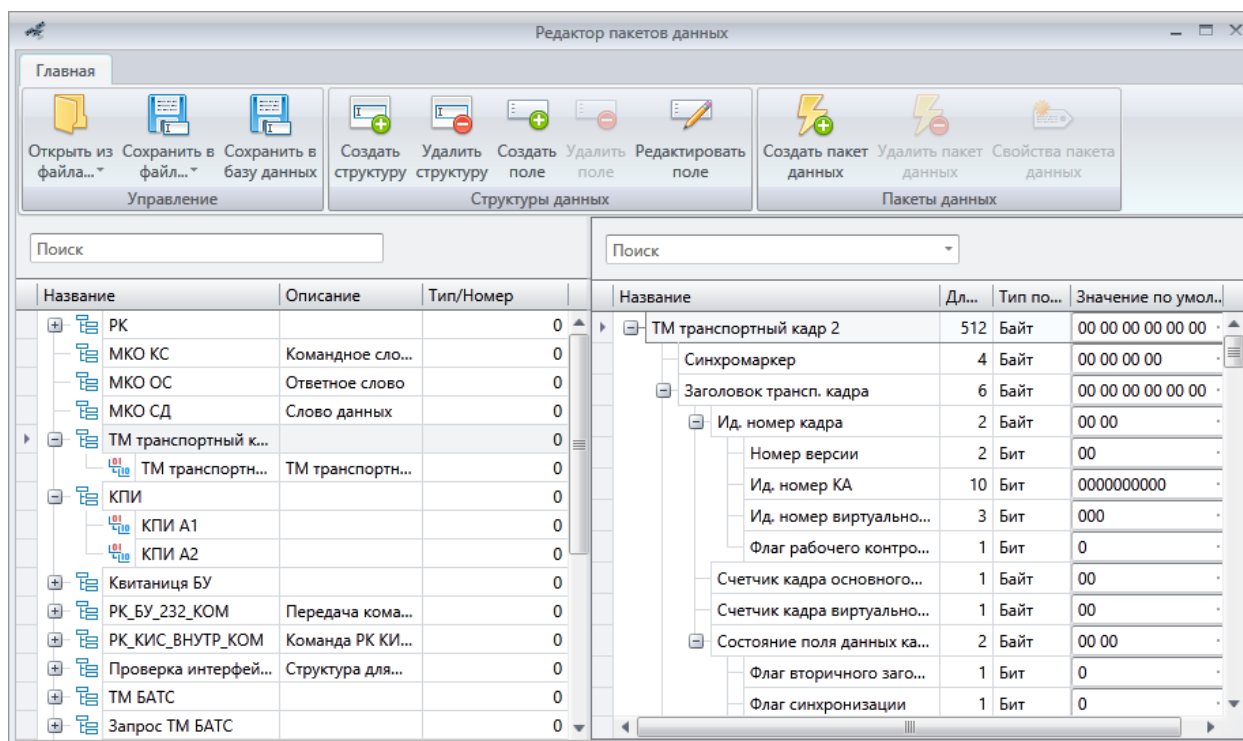


Рисунок 56 – Редактор пакетов данных

Редактор предоставляет инструменты для формирования произвольных структур пакетов и их наполнения и обеспечивает унификацию данных, применяемых для имитационного моделирования, а также для подготовки и проведения испытаний. Структура пакета данных представляет собой описание состава полей пакета, с указанием длины и типа данных.

Предложены методы создания структур пакетов путём выбора из базы данных или из файла. Структура содержит поля: заголовок, поле данных и контрольная сумма (CRC), может быть указано значение по умолчанию. Редактор пакетов данных позволяет создавать массивы командно-программной информации – МКПИ. Для создания МКПИ в редакторе вводится его наименование, перечень полей и указывается файл, из которого следует загрузить поля данных. При за-

грузке выполняется анализ соответствия созданной структуры МКПИ данным из файла.

Удобные инструменты по заполнению, автоматическому вводу заданных при формировании структур параметров и загрузке массивов командно-программной информации обеспечивают информационное сопровождение автономных и комплексных испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата.

5.4. Создание правил функционирования имитационной модели

Предлагается способ задания методов работы имитационной модели в базе знаний и их интеграции с виртуальными инструментами, реализующими функции оборудования: $F = \{R(P, T), Y = V(X)\}$. Правила $R: A(I_i^n, X, K, T) \rightarrow Z(I_i^m, Y, K, T, D(K))$ используют переменные, пакеты данных и таймеры, которые позволяют управлять процессом моделирования. База знаний представляет собой структурированное описание характеристик и методов работы оборудования и позволяет формировать последовательность действий при автоматическом моделировании или в интерактивном пошаговом режиме. Выделяются правила общего назначения, работы блоков модели, выдачи командной и командно-программной информации на системы космического аппарата, приёма и передачи телеметрической информации, контроля состояния бортовой аппаратуры, задания режимов работы оборудования, выбора коммутационного интерфейса, а также обработки событий при изменении параметров модели.

Например, функционирование модели БАТС описано в базе знаний следующими правилами:

<БАТС> Правило № 1

Если интерфейс «Вход» находится в состоянии «Активный» **И** данные, полученные по интерфейсу «Вход», равны значению переменной «Запрос телеметрии» **И** значение логической переменной «Режим формирования телеметрии» равно «Нет» **То** запустить таймер «Таймер формирования ТМ» **И** установить значение логической переменной «Режим формирования телеметрии» равное «Да».

<БАТС> Правило № 2

Если таймер «*Таймер формирования ТМ*» находится в состоянии «*Активный*» **То** передать значение массива данных «*Телеметрия*» по интерфейсу «*Выход*» **И** установить значение логической переменной «*Режим формирования ТМ*» равное «*Нет*».

Эти правила описывают, что должен делать имитатор БАТС, если к нему поступил запрос телеметрии. Первое правило определяет переход в режим формирования телеметрии. Для его выполнения проверяются условия соответствия полученного запроса ожидаемому, и если БАТС в этот момент не выполняет формирование телеметрии, то он переходит в соответствующий режим. При этом запускается таймер (значение таймера задано в модели). После выполнения первого правила программа выбирает новое правило. В результате применения второго правила БАТС передаёт на соответствующий выход массив телеметрии и переходит в режим ожидания запроса телеметрии.

Правила позволяют управлять режимами, параметрами, определять активный интерфейс для основного и резервного комплектов для определённых последовательностей действий. Пример правил для имитатора МИ КИС:

<МИ КИС> *Правило № 1*

Если РК = «*U10002N*» **То** Скорость формирования ТМИ = «*1000 бит/с*»

Правило для выбора интерфейса выдачи КПИ.

<МИ КИС> *Правило № 2*

Если РК = «*U10005N*» **То** Выход = «*Выход_МКО*»

Помимо моделирования определённых действий, связанных с прохождением команд, правила позволяют имитировать реакции системы на условия функционирования, возможные ограничения на значения параметров и реакции модели в случае выхода системы за заданные ограничения:

<МИ КИС> *Правило № 3*

Если Напряжение питания <21 В **То** Действие = «*Выключить МИ КИС*»

<МИ КИС> *Правило № 4*

Если Максимальный ток потребления > 0,3 А **То** Сервисное сообщение = «*Недопустимое значение тока потребления*»

Редактор правил показан на рисунке (Рисунок 57). Он позволяет создавать и изменять правила для элементов графической модели, моделирующих бортовые системы.

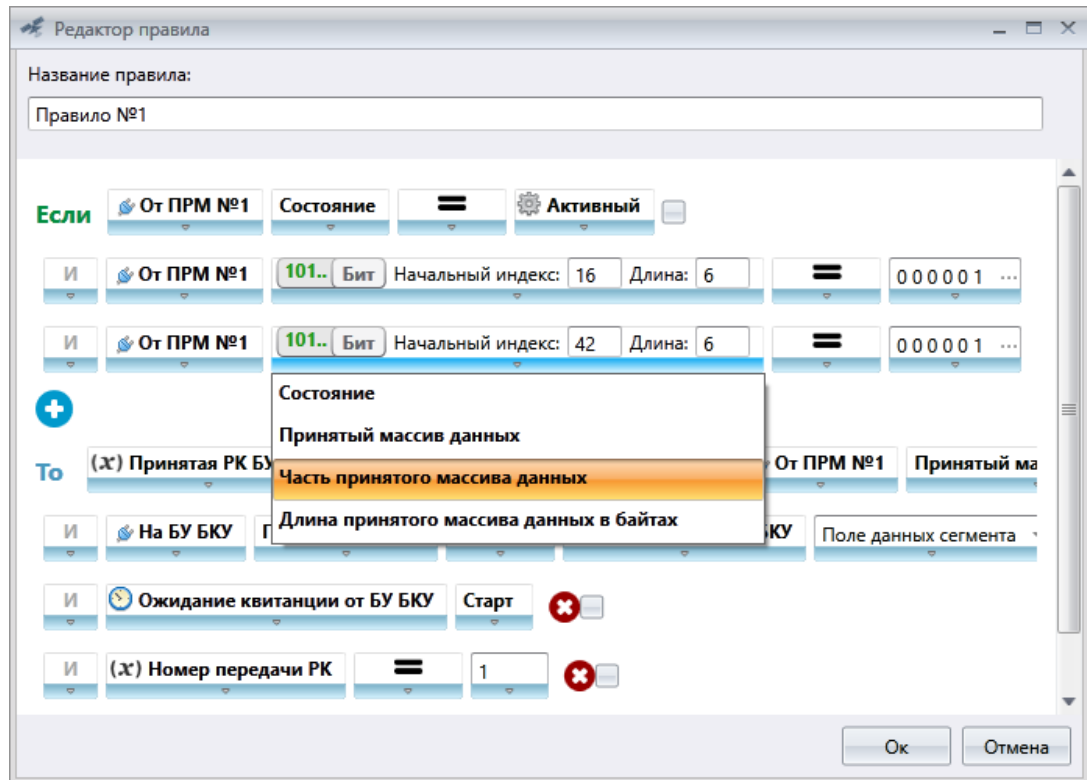


Рисунок 57 – Редактор правил базы знаний

В левой части правила в качестве условия указывается ожидаемое состояние одного из входных интерфейсов элемента модели или его таймера. В правой части – задаётся передача данных на один из исходящих интерфейсов, перевод таймера в заданное состояние или изменение значений переменных. Способ отображения правил близок к естественному языку, что позволяет специалисту предметной области легко их формулировать и рассматривать уже созданные правила. Выполняется синтаксический контроль правил и анализ введённых значений параметров.

На основе базы знаний выполняется имитационное моделирование логики работы систем с визуализацией на графической модели. Поведение модели изменяется через набор правил, а также параметры отдельных элементов, которые позволяют описывать характеристики функционирования и возможные нештатные ситуации.

5.5. Инструменты поддержки проектирования интеллектуальных имитационных моделей

Для оценки построенной конфигурации имитационной модели выполняется расчёт параметров, отражающих соответствие структуры и правил модели. Результаты расчёта отображаются в табличном виде. Пример параметров модели показан на рисунке (Рисунок 58). В таблице для каждого элемента модели рассчитывается число коммутационных интерфейсов (входящих, исходящих, не подключённых), количество правил, таймеров, суммарная задержка по таймерам, число переменных, описанных правилами и др. Приведённые расчёты позволяют оценить корректность модели, активность её элементов и сложность базы знаний.

Элементы	Количество входов	Количество выходов	Количество не подключённых	Общее число	Количество условий	Количество правил	Количество таймеров	Суммарная задержка по таймерам	Количество переменных описанное правилами
БУ БКУ	2	6	0	8	14	5	3	750	6
БАТС	2	0	0	2	7	2	2	500	4
МИ КИС 1	9	11	0	20	202	52	51	610	123
Передатчик 1	4	1	0	5	29	8	4	400	14

Рисунок 58 – Параметры для экспертной оценки модели (по элементам)

Выполнена детализация расчётных параметров, рассмотрены их значения для отдельных коммутационных интерфейсов, созданных в графической структуре модели для каждого её элемента (Рисунок 59). Таблица содержит перечень элементов модели, их коммутационных интерфейсов, вид (входящий/исходящий), тип и количество правил, заданных в базе знаний для каждого интерфейса.

Предложены шаблоны, позволяющие упростить конфигурирование элементов и включение отдельных имитаторов устройств в комплексное решение. Шаблоны содержат основные имитаторы бортовых систем с заданным набором входных и выходных интерфейсов.

Элементы	Интерфейс				
	Название	Вх/Исх	Тип	Количество условий	Количество переменных
БУ БКУ	Выход 2	Входящий	RS-232	1	1
	Вход 2	Входящий	RS-232	2	1
	Выход	Исходящий	RS-232	1	1
	КУ1	Исходящий	Релейный	1	1
	От МИ КИС	Исходящий	Импульсный	0	0
	КУ3	Исходящий	Релейный	1	1
	КУ2	Исходящий	Релейный	1	1
	Вход	Исходящий	RS-232	2	1
БАТС	Вход	Входящий	RS-232	2	1
	Выход	Входящий	RS-232	1	1
МИ КИС 1	От ПРМ 2	Входящий	RS-422	0	0
	КУ2	Входящий	Релейный	0	0

Рисунок 59 – Параметры для оценки модели (по интерфейсам)

Разработаны конфигурации комплексных моделей. Информационное описание элементов модели включает в себя общую информацию, переменные и спецификацию, построенную на основе технических документов реального оборудования. Модель функционирования командно-измерительной системы содержит имитаторы основных устройств бортовой аппаратуры, участвующих в командно-программном управлении бортовой аппаратурой космического аппарата. В её состав входят основные и резервные комплекты, имитирующие функции бортового комплекса управления, бортового цифрового вычислительного комплекса, бортовой аппаратуры телесигнализации, командно-измерительной системы, приёмника, передатчика, а также имитатора наземной станции (НС) в части командно-телеметрического взаимодействия (Рисунок 60).

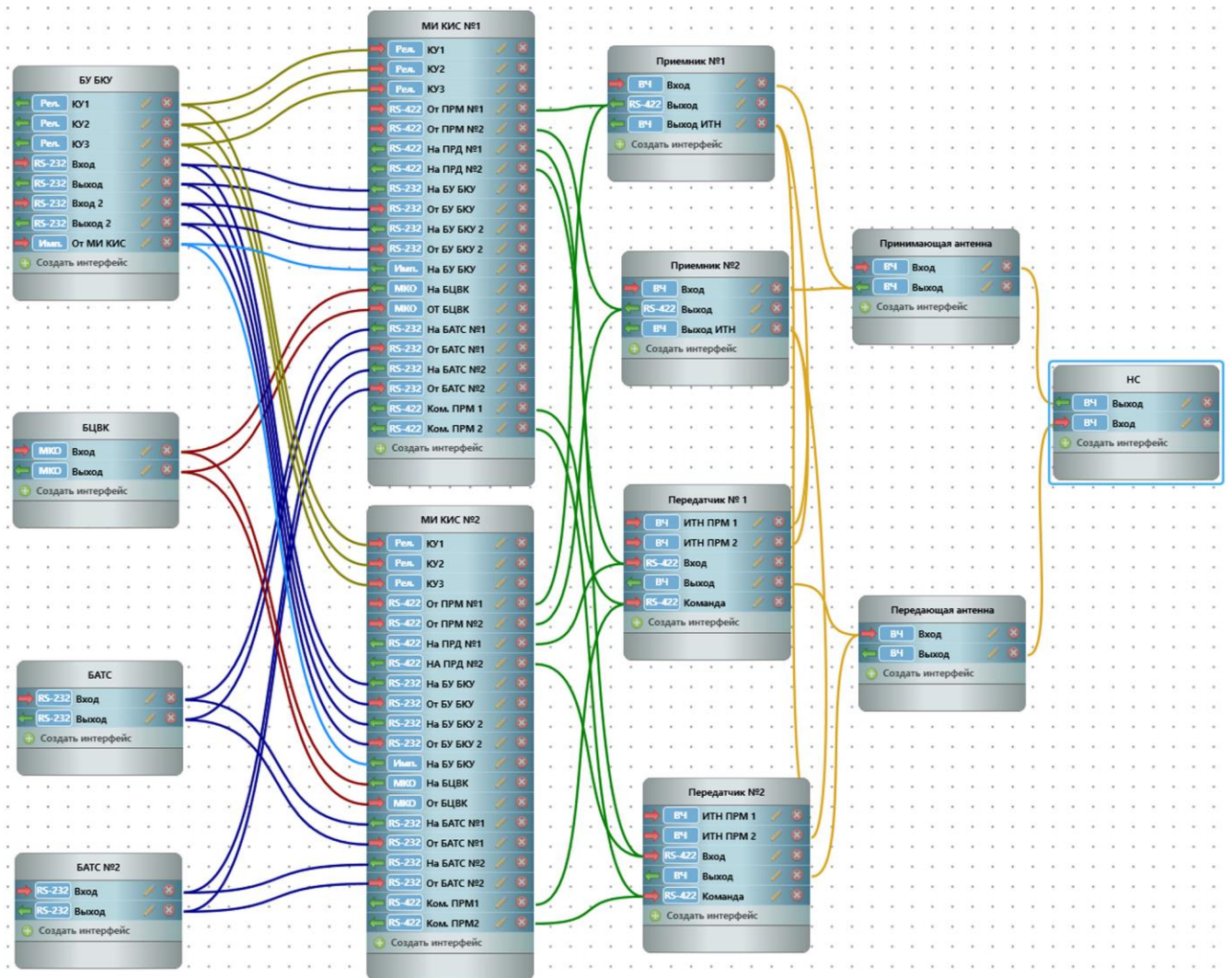


Рисунок 60 – Модель бортовой аппаратуры с резервными блоками

Информационное взаимодействие элементов модели осуществляется с помощью пакетов данных, структура которых соответствует структуре, приведённой в документе «Протокол форматов телекоманд и телеметрии 08176.3000-0» (далее Протокол ТМ_ТК).

В модели заданы правила передачи последовательности команд от имитатора наземного сегмента через заданные промежутки времени. Для моделирования приёма-передачи команд выполнено наполнение базы данных команд $РК_{БУ\ БКУ}$ и $РК_{КИС}$. Список команд, их последовательность и периодичность отправки определяются специальными правилами функционирования имитатора наземного сегмента. Правила функционирования позволяют оперировать пакетами данных, выбранными полями пакета или массивами данных (байт, бит). Выбранные данные

при моделировании передаются на заданный интерфейс или применяются для проверки условий.

В правилах базы знаний модели описана следующая логика работы оборудования: Имитатор МИ КИС моделирует получение команд от имитатора наземного сегмента в соответствии с перечнем команд. Получив команду, имитатор МИ КИС проверяет в принятом пакете поле «Номер виртуального канала» для определения того, основному или резервному МИ КИС адресована команда. Если номер виртуального канала не совпадает с ожидаемым значением, то команда пропускается. Далее проверяется поле «Признак МАР» для определения назначения команды: для БУ БКУ или для МИ КИС.

Если принятая команда предназначена для БУ БКУ, имитатор МИ КИС отрабатывает алгоритм выдачи команды на БУ БКУ. МИ КИС выбирает в поле данных полученного пакета 3 байта: служебный, прямой код РК, инверсный код РК, передаёт их по основному каналу БУ БКУ и ждёт квитанции заданное время. Если в период ожидания не была квитанция от БУ БКУ, то МИ КИС выполняет передачу по резервному каналу и ожидает квитанции на протяжении заданного тайм-аута. Если после истечения времени ожидания (второй попытки передачи) квитанция не получена, МИ КИС добавляет в телеметрию, в поле «Отчёт обмена с БУ БКУ», соответствующую квитанцию о неудачной передаче. Если от БУ БКУ получена квитанция, имитатор МИ КИС формирует квитанцию, в которой содержится номер успешной попытки и первый байт переданной команды.

Если принятая команда предназначена для МИ КИС, он отрабатывает алгоритм выполнения команды в зависимости от её назначения. При этом выполняется изменение состояния имитатора МИ КИС и приёма-передающих устройств, а также изменение телеметрии.

При приёме команд, отвечающих за включение генераторов телеметрии, имитатор МИ КИС начинает отработку алгоритма запроса телеметрии у БАТС и формирования общей телеметрии для передачи её в наземный сегмент. После запуска генератора телеметрии МИ КИС отправляет запрос на получение телеметрии на основной БАТС и ожидает ответа заданный период времени. При истече-

нии времени ожидания МИ КИС выполняет повторный запрос телеметрии у основного БАТС. В случае отсутствия ответа по истечении времени ожидания МИ КИС выполняет запрос телеметрии на резервный БАТС. При неполучении ответа за заданное время выполняется повторный запрос. В случае отсутствия ответа на все выполненные МИ КИС запросы он в поле общей телеметрии вставляет заданный массив байт. В случае получения ответа с телеметрией от БАТС МИ КИС вставляет в данное поле полученную телеметрию. После формирования общей телеметрии МИ КИС отправляет её через активный передатчик.

При приёме команд, отвечающих за выбор режима ТМИ, в телеметрии изменяется соответствующее поле, определяющее скорость передачи ТМИ. При приёме одной из 16 команд, предназначенных для управления БУ БКУ, имитатор МИ КИС отображает информацию, что требуется передать по импульсному интерфейсу значение заданной длительности и амплитуды импульса. При приёме команд, предназначенных для включения передатчиков, имитатор МИ КИС устанавливает активный передатчик, до его изменения моделирование передачи данных выполняется через заданный командой передатчик. При приёме команды управления режимами и входами измерения дальности имитатор МИ КИС выдаёт соответствующую команду на активный передатчик для изменения его состояния. После установки для передатчика режима «Измерения текущих навигационных параметров» (ИТНП) имитируется передача поступающего на его вход ВЧ-сигнала на имитатор наземного сегмента. Наглядный способ задания логики работы модели в виде правил предоставляет удобные механизмы модификации модели.

Инструменты поддержки проектирования модели предоставляют механизмы оценки вероятности безотказной работы проектируемой конфигурации бортовых систем. Оценка выполняется в соответствии с ГОСТ Р 51901.14-2007 в подсистеме «Расчёт надёжности» (Рисунок 61).

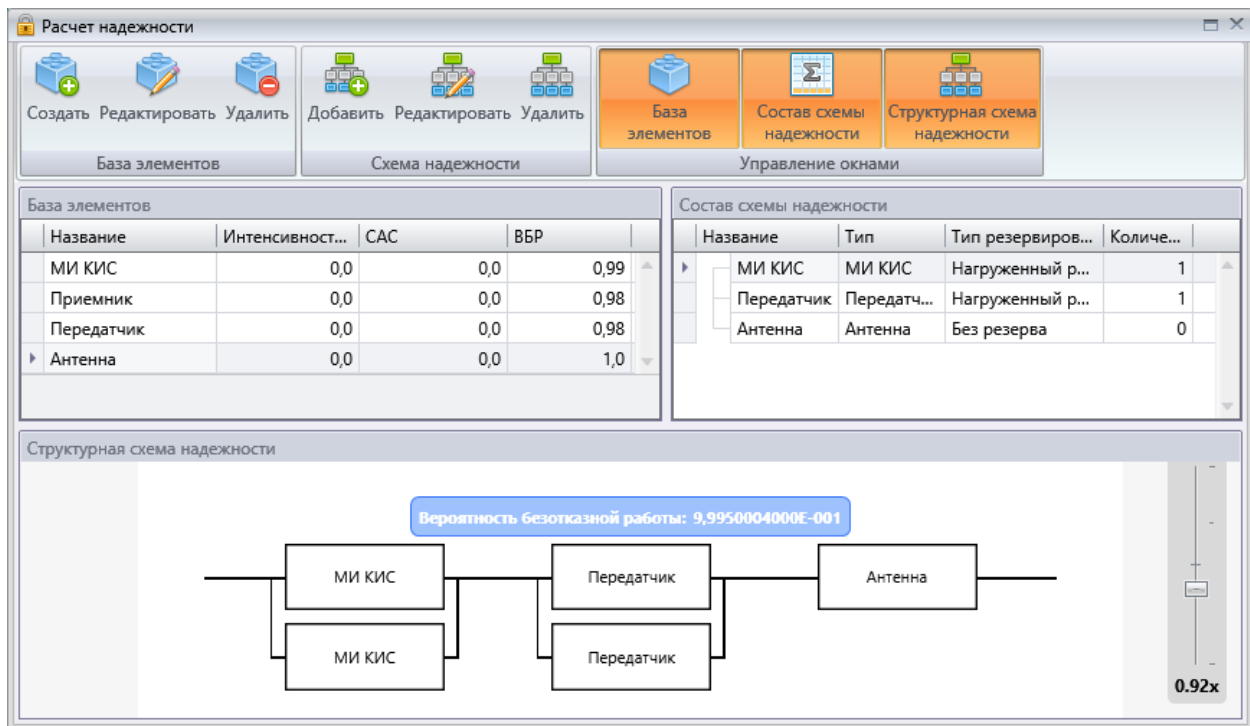


Рисунок 61 – Программные инструменты «Расчёт надёжности»

Подсистема позволяет создавать и редактировать структурные схемы, определяющие конфигурацию бортовой аппаратуры и выполнять расчёт. Выполнено проектирование базы оборудования, включающей необходимые для расчёта характеристики. Для каждого элемента в базе указываются параметры: название, интенсивность отказов, срок активного существования, вероятность безотказной работы. Способ резервирования определяет метод расчёта вероятности безотказной работы для построенной схемы.

Изменение состава элементов, типа резервирования, количества резервных комплектов позволяют выполнять сравнение различных способов организации модели и обоснованно выбирать набор резервов с точки зрения общей надёжности оборудования.

5.6. Структурно-графический анализ имитационной модели

Предложены инструменты структурно-графического анализа модели, позволяющие исследовать проектируемые бортовые системы. Инструменты выполняют интерпретацию формального описания модели и базы знаний в интерактивные

графические образы инфографики [87, 291]. Инструменты построены на основе библиотек интерактивной инфографики d3.js и sigma.js [250].

Для анализа структуры модели и функциональных связей, заданных в базе знаний применяется диаграмма зависимостей, секции которой обозначают элементы модели – имитаторы бортовых устройств, а лучи – направления взаимодействия, заданные в базе знаний. Инструменты построения диаграмм позволяют интерактивно выбирать зависимости отдельных элементов модели, определять ошибки базы знаний, выявить недостающие или избыточные данные и структуры, для которых не заданы правила в базе знаний, обеспечивая контроль полноты функционального представления. На основе проведённого анализа программное обеспечение формирует таблицу с перечнем ошибок (Рисунок 62).

Таблица ошибок

Передающий блок	Интерфейс	Принимающий блок	Интерфейс
Описание ошибки передающего блока		Описание ошибки принимающего блока	
МИ КИС 2	От БАТС 1	БАТС	Выход
Для передающего интерфейса описано правило приёма.		Принимающий интерфейс, в блоке указан передающим. Для принимающего интерфейса нет правил.	
МИ КИС 1	На БЦВК	БЦВК	Вход
Для передающего интерфейса нет правил.		Для принимающего интерфейса нет правил.	
МИ КИС 1	На БУ БКУ 2	БУ БКУ	Вход 2
		Для принимающего интерфейса описано правил передачи.	

Рисунок 62 – Таблица ошибок функциональных зависимостей

Таблица содержит перечень наименований элементов модели (передающий или принимающий блок), интерфейсов и описание найденных ошибок.

Исследование коммуникационной нагрузки модели выполняется на специальном графе, узлы которого представляют элементы модели, дуги – пути их взаимодействия с другими подмоделями (Рисунок 63). В построенном графе размер узлов и ширина дуг отображают степень нагрузки, вычисляемую как мощность множества правил для элементов модели. Высокая загруженность элементов модели рекомендует её пересмотр и резервирование оборудования и коммутации.

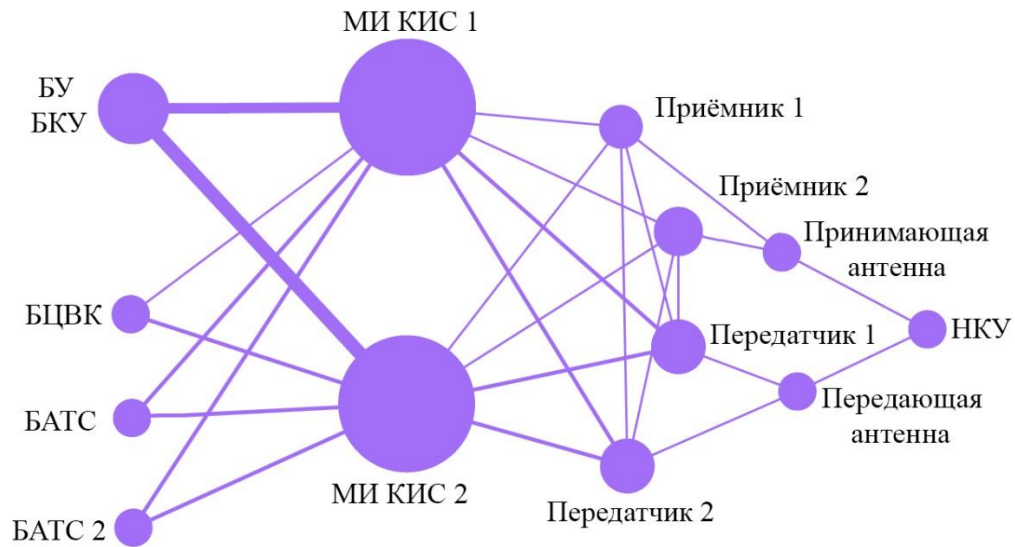


Рисунок 63 – Граф нагрузки на элементы модели

Программное обеспечение формирует таблицу предупреждений о превышении средней нагрузки, в которой приводятся перечень элементов, коммутационных интерфейсов и соединений, для которых нагрузка превышает среднюю, рассчитанную по всем элементам модели, и рекомендации о резервировании устройств или линий связи.

Созданы интерактивные графические элементы, которые позволяют визуализировать показатели покрытия структуры модели правилами базы знаний. Графически выделяются элементы модели, в составе которых все интерфейсы описаны логическими правилами, либо отдельные узлы не имеют правил. На графе отображаются начальные и конечные интерфейсы элементов модели и коммутационные соединения, по которым правилами не предусмотрена передача данных. Наличие таких соединений свидетельствует об ошибках проектирования модели.

Для анализа полноты базы знаний и её верификации применяется граф связности, отражающий цепочки правил базы знаний (Рисунок 64). Фрагмент графа связности демонстрирует наличие двух процессов, первый из которых инициируется по интерфейсам «Запрос ТМ» для основного МИ КИС 1 и резервного МИ КИС 2, и второй – по интерфейсам «Обработка РК».

Выделяются отдельные «несвязные» участки графа, для которых правилами описываются события, не зависящие от двух основных процессов функциониро-

вания бортовой аппаратуры и фрагменты графа, которые не инициируют цепочек логического вывода (моделирование режима ИТН, имитация передачи от БУ БКУ импульсных команд на МИ КИС и пр.).

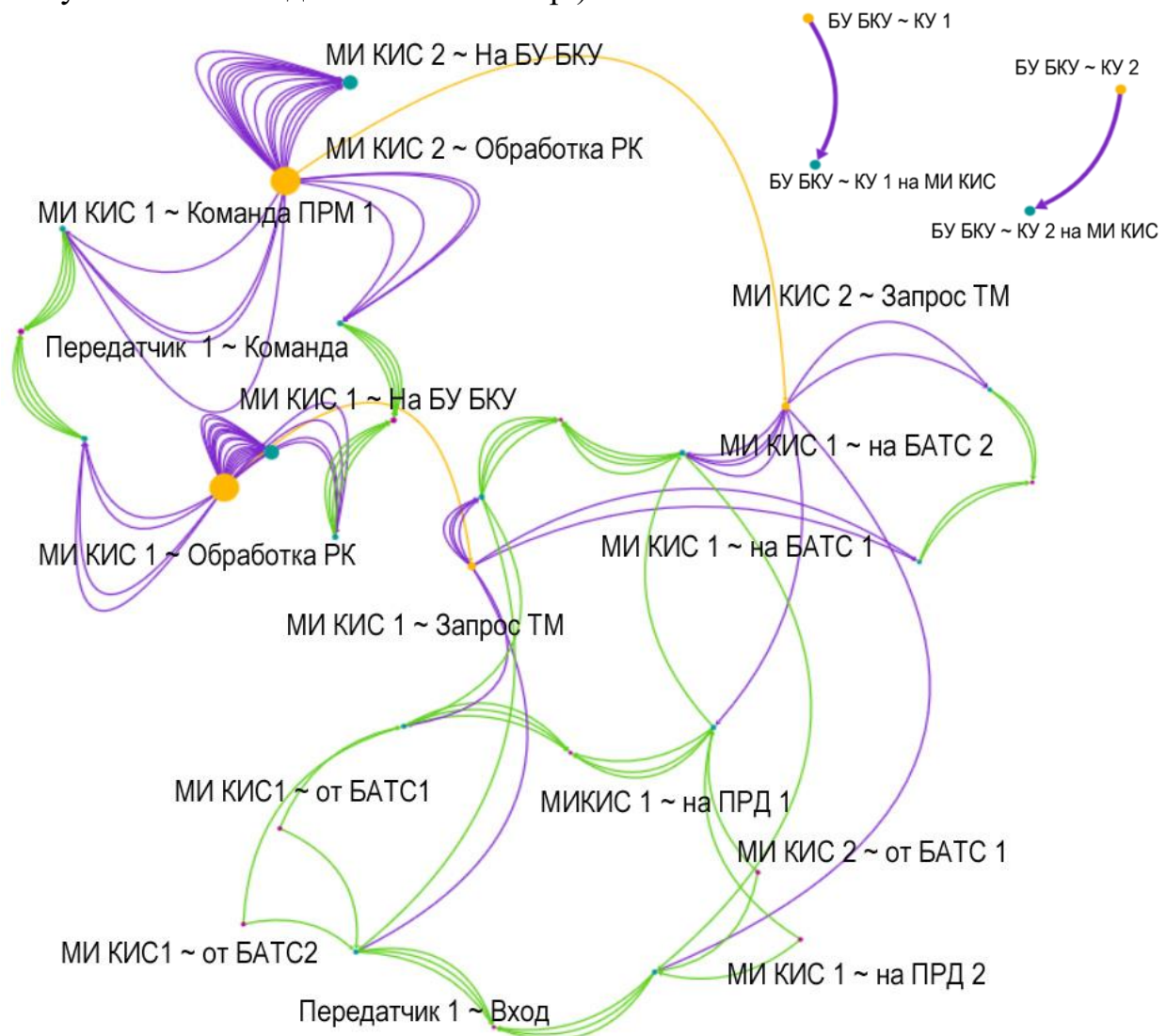


Рисунок 64 – Фрагмент графа связности правил

Визуализация структуры и правил модели на графических представлениях 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 и соответствия моделей техническим описаниям, заданным в конструкторской документации. Инструменты позволяют выполнять анализ полноты программ испытаний, сопоставляя базу знаний, построенную по испытаниям с эталонной базой, основанной на конструкторской документации. При итерационном

процессе построения модели, объединении различных подмоделей в комплексное решение возникает необходимость оценки синтаксиса правил и конфигурации модели. Перечень содержит наименование элементов модели (блоков), в которые входят коммутационные соединения, конфигурация которых выполнена с ошибками. Описание ошибки в текстовом виде отражает выявленное несоответствие.

5.7. Имитационное моделирование функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата

Предлагается объединение графической модели и базы знаний для имитации и анализа функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата [306]. Расширенные алгоритмы логического вывода позволяют выполнять последовательности продукционных правил, изменяющих состояние модели, имитировать прохождение пакетов команд и телеметрии и выполнять визуализацию на графической модели [313]. Для управления логическим выводом вводятся параметры: «Коэффициент замедления работы модели» и «Период дискретизации». Коэффициент замедления позволяет задавать отношение между длительностью событий, заданных для моделирования, и длительностью отображения этих событий в модели. Период дискретизации устанавливает моменты изменения модели.

Визуализация моделирования выполняется на графической структуре и в табличном представлении (Рисунок 65). На каждом шаге моделирования выполняется просмотр antecedентов правил, в которых заданы условия их применения. Если найдено правило, для которого истинны все условия его применения, то состояние модели изменяется заданным в консеквенте правила способом. Элементы модели функционируют независимо друг от друга, на каждом шаге моделирования применяются правила, изменяющие состояние модели, выполняется передача, приём и обработка команд, а также формирование и передача телеметрии. При передаче данных от одного элемента модели к другому подсвечиваются активные имитаторы и коммутационные соединения, по которым выполняется передача.

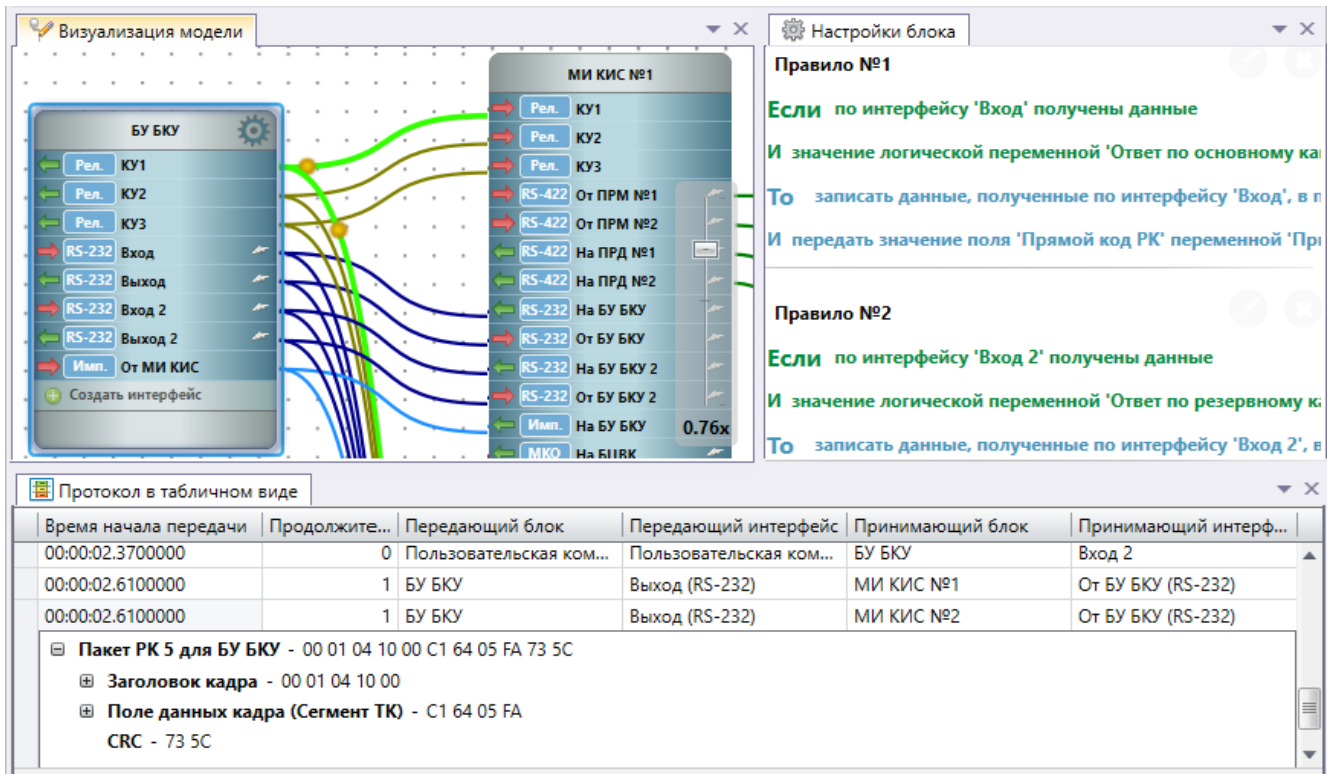


Рисунок 65 – Визуализация передачи данных

Предлагается интерактивный режим моделирования, позволяющий вносить изменение в значения переменных или выполнять выбор команд управления для передачи и имитации различных модельных ситуаций. Выбор осуществляется из базы команд. Структура пакета соответствует структуре РК_{КИС} или РК_{БКУ}. Получаемые, передаваемые и обрабатываемые данные сохраняются в протоколе имитационного моделирования, который содержит перечень элементов модели, выполняемые действия, пакеты данных с привязкой ко времени.

По результатам моделирования формируется отчёт, содержащий все записи протокола имитационного моделирования. Предлагается структура отчёта, включающая сведения о проведённом имитационном эксперименте и результаты моделирования. Если при моделировании выполнялась передача пакетов данных, то весь передаваемый набор данных отображается в отчёте. Если при моделировании передача данных невозможна при заданных параметрах модели, в отчёт выдаётся сообщение об ошибке.

5.8. Интеграция виртуальных приборов в имитационную модель

Предлагается интеграция интеллектуальной имитационной модели и виртуальных инструментов. Показан пример гетерогенной модели, содержащей виртуальные инструменты, имитирующие приёмо-передающий тракт и логические модели функционирования бортовой аппаратуры [75, 285]. Используются виртуальные инструменты, которые моделируют работу основных узлов: смеситель, гетеродин, усилитель мощности, входной и выходной фильтр. Для работы модели вводятся характеристики оборудования, показанные на рисунке. Результатом моделирования являются параметры, отражающие вероятности появления ошибок при прохождении испытательного сигнала через модель – BER (Bit Error Rate) и величина отклонения полученной модуляции от переданной – MER (Modulation Error Ratio) (Рисунок 66). На рисунке показан пример модели с расчётными параметрами вероятности появления ошибок и величины отклонения. Полученные параметры являются определяющими при оценке работоспособности различных конфигураций приёмника и передатчика.

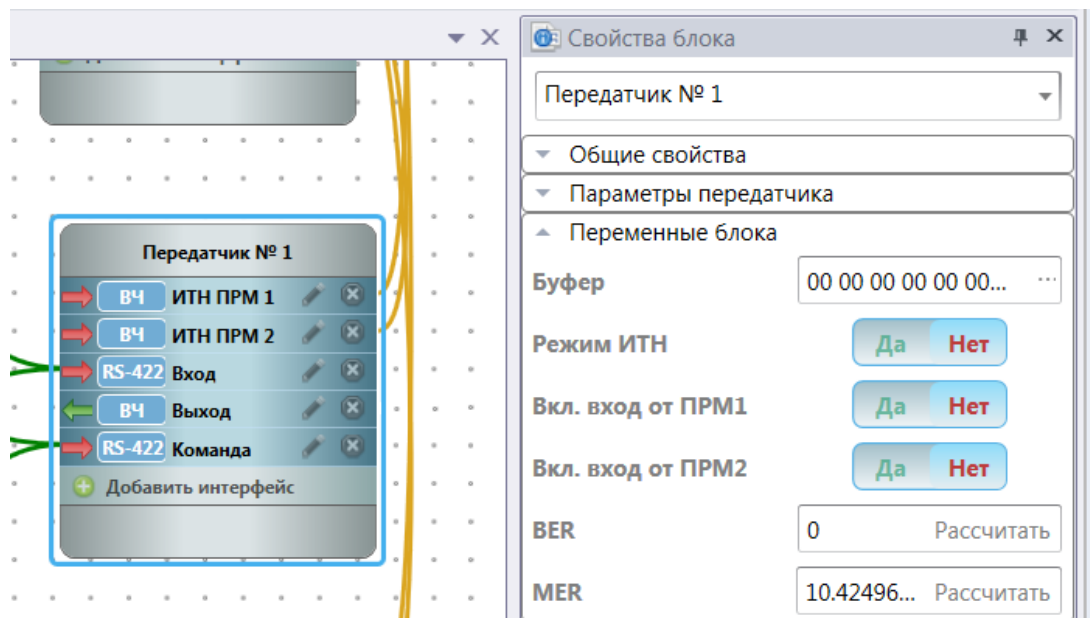


Рисунок 66 – Расчёт параметров приёмо-передающих устройств

Расширенные средства моделирования, включающие интеграцию с виртуальными приборами [160], обеспечивают проведение имитационных эксперимен-

тов, имитируя поведение командно-измерительной системы при изменении характеристик функционирования.

5.9. Примеры задач моделирования технических систем

Новая технология интеллектуального имитационного моделирования может применяться для построения и исследования моделей технических систем в других предметных областях [141]. Существенную роль в применимости новой технологии играет обеспечение анализа командно-программного взаимодействия устройств. Рассмотрена задача построения сети устройств в технологии промышленного интернета вещей. Проектируемая сеть имеет три уровня устройств: на верхнем уровне исполнительное и обрабатывающее оборудование для управления устройствами, взаимодействия (коммуникации) с хостом и мониторинга данных устройств нижнего уровня; на среднем уровне каналообразующее оборудование: маршрутизаторы и точки доступа; нижний уровень представлен датчиками для измерения, мониторинга и реализации управления. Устройство верхнего уровня представлено промышленным компьютером, его характеристики определяются исходя из объёма передаваемых и анализируемых данных и требований по оперативности систем. На нижнем уровне устанавливаются модули для измерения температуры, влажности, точки росы и концентрации мелкодисперсной пыли и исполнительные устройства. Коммутационные интерфейсы: RS-485/Ethernet, wi-fi.

Строится графическая модель схемы сети и правила информационного взаимодействия для устройств разных уровней. В отличие от других подходов, где исследуются характеристики устройств, пропускная способность сети и возможные потери данных, в построенной модели внимание направлено на проектирование и моделирование командного управления оборудованием. Исследуется возможность использования проводных или беспроводных подключений по уровням сети, конфликты сети, основные и резервные пути передачи данных. Решается задача моделирования командного управления исполнительными устройствами при контроле данных с измерительных модулей. Результатом являются варианты под-

ключения оборудования и подходящие конфигурации устройств в зависимости от сложности задачи управления.

5.10. Анализ имитационной модели на основе испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата

Предложены инструменты анализа интеллектуальной имитационно модели. Программное обеспечение выполняет сравнение ответов бортовых систем, полученных в телеметрии объекта контроля при проведении испытаний, с результатами имитационного моделирования [281]. Результаты анализа отображаются в окне программы «Проверка команд» (Рисунок 67).

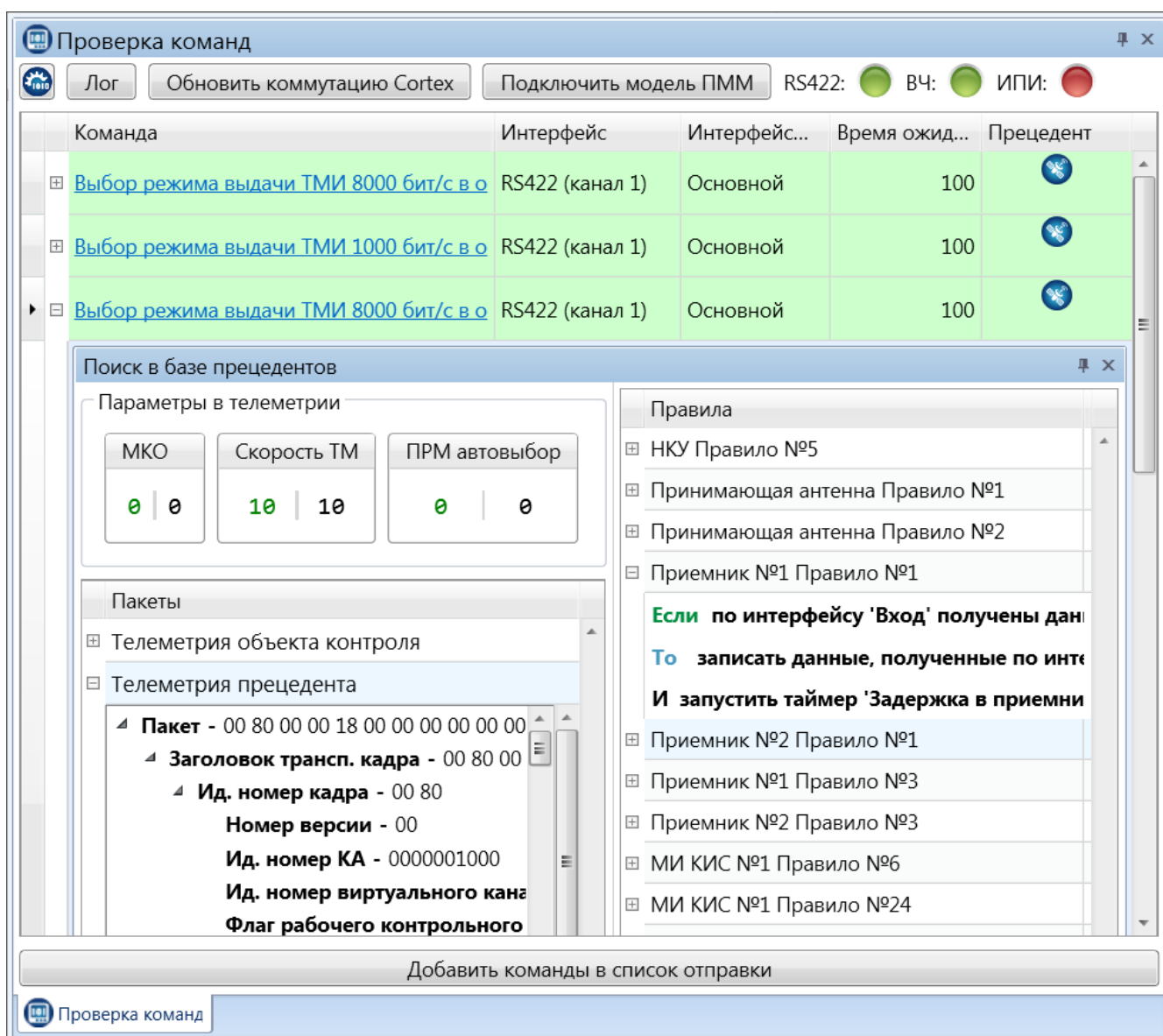


Рисунок 67 – Анализ базы знаний по результатам испытаний

В процессе испытаний команды передаются в объект контроля и имитационную модель, поступающая телеметрическая информация анализируется. При обнаружении различающихся значений параметров обработки команд отображаются отправленные команды, найденные значения и правила базы знаний. Несовпадение результатов моделирования и данных, полученных от объекта контроля, требует доработки базы знаний имитационной модели. В случае, когда имитационная модель не содержит правил обработки команды, заданной при испытаниях бортовой аппаратуры, требуется дополнить базу знаний методами передачи и контроля данной команды. Для расширения базы знаний разработан метод генерации правил на основе испытательных процедур. Метод анализа имитационной модели позволяет сделать вывод о том, что база знаний в полной мере отражает процессы приёма-передачи команд и может применяться для анализа функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

5.11. Формирование правил базы знаний на основе результатов испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата

Для наполнения цифровых двойников данными натурных испытаний предлагаются инструменты формирования баз знаний на основе испытательных процедур и результатов испытаний технических систем.

Испытательные процедуры описывают действия имитаторов бортового управления БКУ и наземного сегмента в части передачи команд и анализа телеметрии. База команд содержит команды, предназначенные для передачи и обработки бортовым комплексом управления РК_{БКУ} и команды для командно-измерительной системы РК_{КИС}. Испытательные процедуры задаются для всех типов команд и содержат интерфейсы для передачи (КПА-КИС, МИ КИС-БКУ), ответ имитатора БКУ, критерии анализа (контроль квитанции ТМ, контроль реакции МИ КИС-БКУ, контроль реакции в ТМ) и параметры: время ожидания реакции, количество повторений, количество попыток отправки, способ выдачи команды (ручной или автоматический). На основе испытательных процедур команд РК_{БКУ} в базе знаний формируются правила передачи команды и методы её кон-

троля. Пример автоматически построенного правила контроля телеметрии показано на рисунке (Рисунок 68). Условия контроля телеметрического кадра, формируемого программами имитаторами, содержит параметры, которые были указаны в испытательной процедуре. Перечень параметров может быть различным и определяется конструктором бортовой аппаратуры при подготовке испытаний. Для имитатора МИ КИС в базе знаний создаются правила приёма команды, квитирования и передачи её в имитатор БУ БКУ. Для имитатора БУ БКУ автоматически создаются правила формирования ответов в МИ КИС.

На основе испытательных процедур команд РК_{КИС} в базе знаний создаются правила имитатора наземного сегмента и имитатора МИ КИС, описывающие передачу и обработку команд РК_{КИС}.

The screenshot displays a rule configuration window with the following structure:

- Если** (If):
 - Вход** (Input): **Получены данные** (Data received)
- И** (And):
 - Время ожидания реакции в ТМ, мс** (Response waiting time in TM, ms): **Период выполнения** (Execution period) **≠** **0**
- То** (Then):
 - (x) Принятый пакет ТМ** (Received TM packet): **Структура ТМ** (TM structure) **=** **Вход** (Input) **Принятый массив данных** (Received data array)
 - И** (And): **(x) Принятый пакет ТМ** (Received TM packet): **Первый байт команды данных** (First byte of command data) **=** **00000010 ...**
 - И** (And): **(x) Принятый пакет ТМ** (Received TM packet): **Адресуемый интерфейс** (Addressed interface) **=** **0 ...**
 - И** (And): **(x) Принятый пакет ТМ** (Received TM packet): **Тип команды** (Command type) **=** **01 ...**
 - И** (And): **(x) Принятый пакет ТМ** (Received TM packet): **Текущее состояние квитирования БКУ** (Current status of BCU acknowledgment) **=** **00 ...**

Рисунок 68 – Правило имитатора для контроля телеметрии

Созданные автоматически правила устанавливают значения параметров телеметрического кадра в имитационной модели. Если база знаний уже содержит правила обработки команды, то они дополняются правилами из процедуры испытаний. В имитационной модели команды РК_{КИС} описаны действия имитаторов (переключение активных интерфейсов, основных или резервных комплектов, изменение скорости передачи и пр.).

Дополнение параметров контроля из испытательной процедуры расширяет имитационную модель. После формирования новых правил следует выполнить контроль базы знаний. База знаний, построенная на основе испытательных процедур, предназначена для исследования методов работы бортовой аппаратуры в процессе её испытаний и эксплуатации.

5.12. Технологические аспекты организации исследовательской среды

Разработаны проектные решения для формирования исследовательской среды на основе имитационной модели функционирования бортовой аппаратуры, предназначенные для подготовки квалифицированных специалистов предметной области [172]. Для создания и хранения информационных ресурсов разработана структура базы данных. В её составе справочники: «Тип курса», «Глубина представления материала», «Тип пользователя», «Опыт работы». Информационно-справочный материал представлен в базе данных в таблицах: «Оглавление», «Учебные материалы», «Вопросы контрольно-измерительных материалов», «Варианты ответов», «Ключевые слова». Для работы с зависимыми разделами учебных курсов – таблицы связи: таблица «Разделы и оглавления» позволяет построить цепочку «требуется изучить до...»; «Вопросы и оглавления» – проводить опрос по темам, таблица «Ключевые слова» позволяет устанавливать связи между понятиями; «Ключевые слова и оглавление» предназначена для поиска разделов, в которых объявляется или уточняется понятие (ключевое слово).

Программное обеспечение позволяет формировать разделы содержания справочных материалов, выполнять их наполнение, строить тематический тезаурус и создавать примеры имитационного моделирования. Функции содержательного наполнения [99Колдырев,] предназначены для работы специалистов, отвечающих за создание справочных материалов и формирование исследовательских задач. Программные инструменты позволяют изменять или дополнять разделы и справочные материалы в соответствии с целью создания исследовательской среды. Имитационные примеры входят в иллюстративные материалы исследовательской среды и при их дополнении теоретическими описаниями предназначены для

повышения навыков работы конструкторов бортовой аппаратуры с новым оборудованием (Рисунок 69).

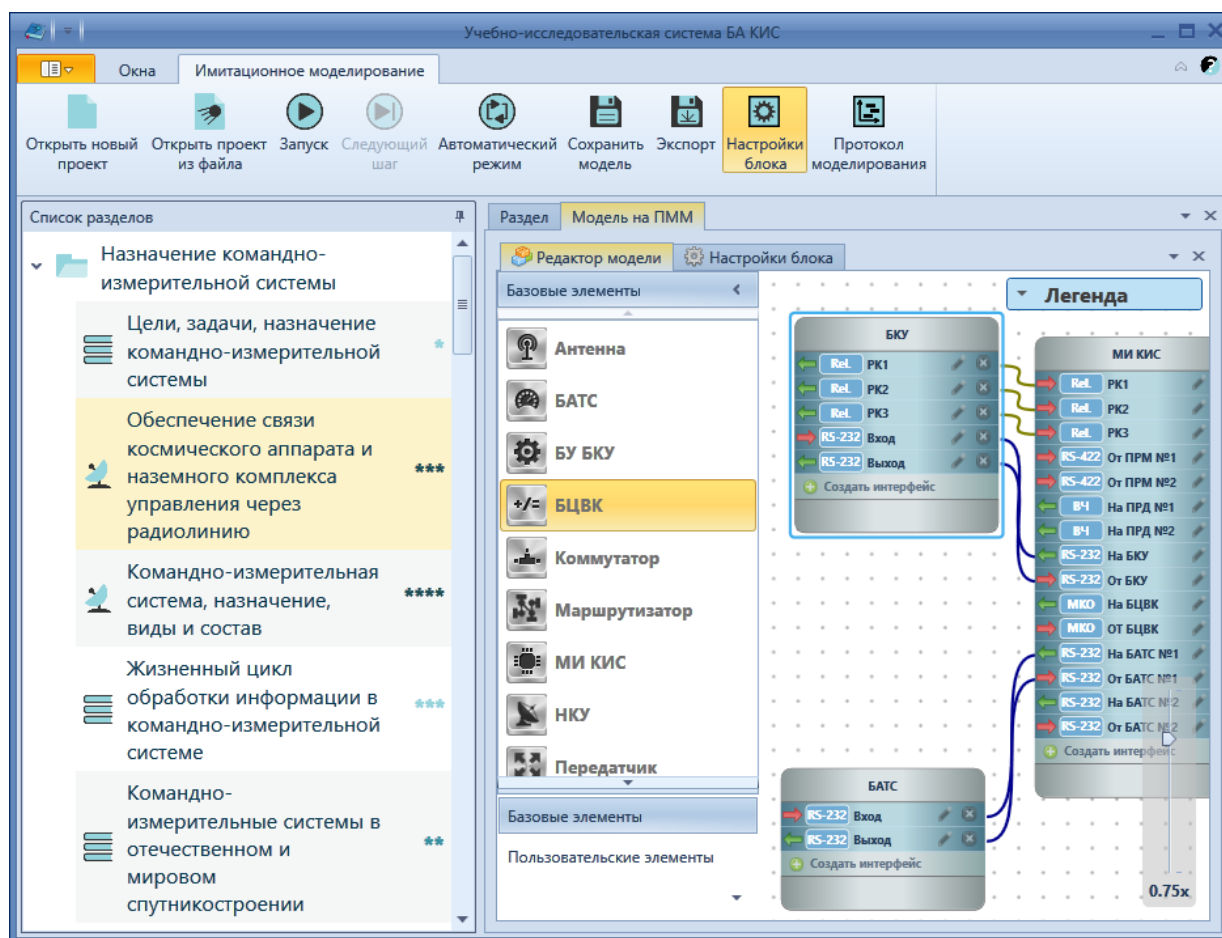


Рисунок 69 – Создание примера имитационного моделирования

Для формирования рекомендуемых последовательностей изучения материалов предложены функции для определения зависимых разделов и средства формирования расширенного тематического тезауруса. Заданные зависимости позволяет отвечать на вопрос, какой набор материалов следует рассмотреть перед выбранной темой для её успешного понимания.

Предложены инструменты формирования тематического тезауруса, который представляет собой расширенный справочник ключевых слов, описывающих отдельные понятия предметной области и смысловые зависимости, позволяющие строить последовательность тем для освоения выбранного понятия. Поддерживаются функции контроля знаний. Предложены инструменты для контроля знаний по отдельным темам, разделам или примерам имитационного моделирования. Во-

просы характеризуются сложностью, которая устанавливается эмпирически по статистике результатов опросов тестовых групп. Для успешного прохождения тестов предусмотрена возможность создания рекомендаций и интерактивных подсказок, которые представляют собой информацию о порядке действий или дополнительные разъяснения для вопроса. Поддерживается навигация по содержанию разделов, интерактивному тезаурусу, ключевым словам. Реализован переход от теоретических разделов к примерам, поясняющими рассматриваемые понятия. Выполняется имитация по правилам, заданным в модели, строится и отображается протокол моделирования.

5.13. Выводы к главе 5

Выполнено проектирование проблемно-ориентированной системы – ПММ БА КИС, реализующей цифровых двойников для поддержки научно-производственных процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов. Система позволяет 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, обеспечивая построение базовых компонент цифровых двойников и применять их в процессах проектирования, разработки и испытаний командно-измерительных систем космических аппаратов.

Созданы проектные решения и спецификации на автоматизируемые функции программного обеспечения, а также структуры баз данных, которые позволили в полном объеме реализовать методы технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов. В его составе подсистема для ведения баз данных, подсистема построения графической модели, редактор пакетов данных, редактор правил функционирования модели, подсистема формирования правил, инструменты структурно-графического анализа модели, подсистема интеграции с виртуальными инструментами, подсистема имитационного моделирования, подсистема редактирования

учебных материалов, подсистема интеграции с имитационной моделью в исследовательской среде, подсистема визуализации учебных материалов и контроля знаний.

Программное обеспечение позволяет выполнять графическое и имитационное моделирование логического уровня командно-измерительной системы космического аппарата и её командно-телеметрического взаимодействия с бортовыми и наземными системами. Расширенные средства моделирования, включающие интеграцию с виртуальными приборами, обеспечивают проведение имитационных экспериментов, имитируя поведение бортовых систем при изменении характеристик функционирования и выполнять проектирование и анализ командно-программного метода управления космическим аппаратом. Реализация методов на основе эвристик для построения моделей, шаблонов, описывающих режимы работы бортовых систем, методов формирования правил на основе программ испытаний обеспечивают удобные настраиваемые инструменты для моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов.

ГЛАВА 6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ИСПЫТАНИЙ

6.1. Назначение и состав программного обеспечения для поддержки испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата

Разработаны проектные решения для создания проблемно-ориентированной системы ПО КПА, предназначенной для проведения испытаний бортовых систем космических аппаратов [214]. Программное обеспечение выполняет актуализацию цифровых двойников функционирования бортовых систем данными натурных испытаний, предоставляя инструменты накопления, хранения и анализа ретроспективных и актуальных данных. Для получения данных ПО КПА обеспечивает взаимодействие с объектом контроля посредством испытательного оборудования КПА и специализированных библиотек виртуальных приборов. КПА представляет собой взаимосвязанное измерительное оборудование для проведения высоко- и низкочастотных испытаний командно-измерительной системы. ПО КПА построено по двухуровневой архитектуре [218] (Рисунок 70).

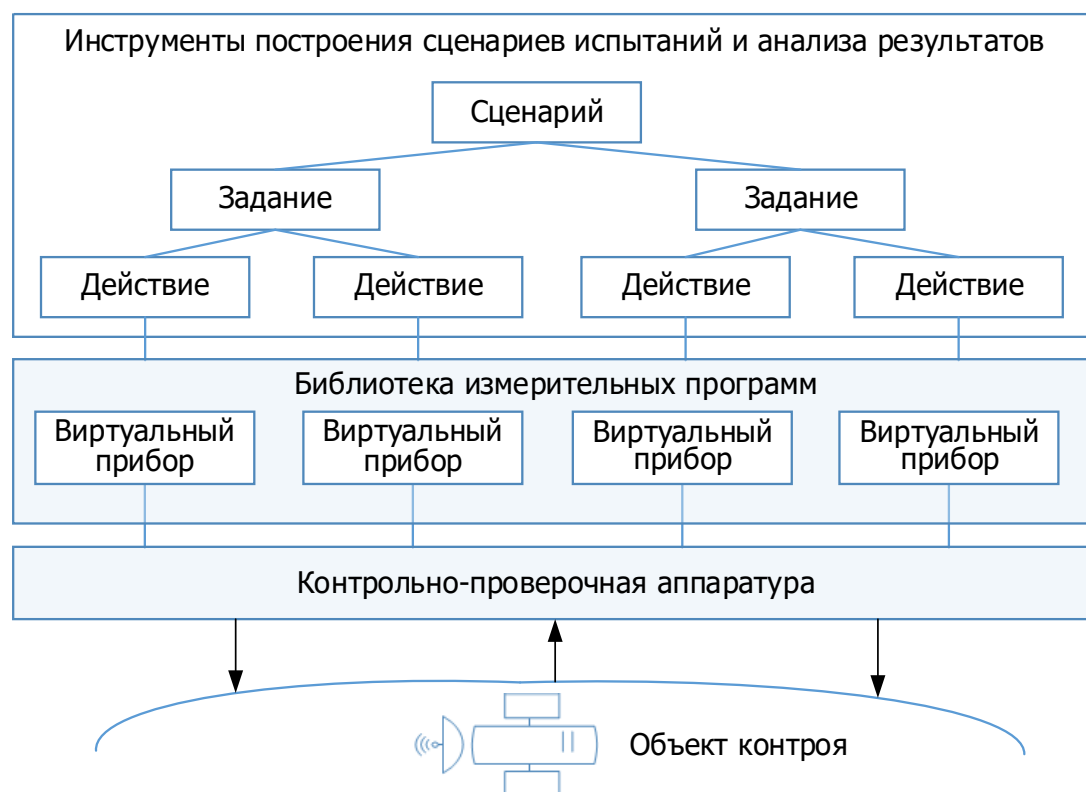


Рисунок 70 – Двухуровневая архитектура автоматизации испытаний

На первом уровне расположены методы подготовки и проведения испытаний, обеспечивающие взаимодействие с конструктором бортовой аппаратуры. На втором уровне расположены библиотеки измерительных программ, выполненные в среде технического моделирования. Библиотеки программ задают способы взаимодействия с испытательным оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры. Методы создания КПА и библиотек программ работы с оборудованием не являются частью данного исследования, их разработка выполнена специалистами Сибирского федерального университета [52, 100]. При необходимости методы из библиотеки могут модифицироваться или заменяться в процессе подготовки испытаний.

Выполнено проектирование схемы размещения программного обеспечения и баз данных [215] (Рисунок 71).

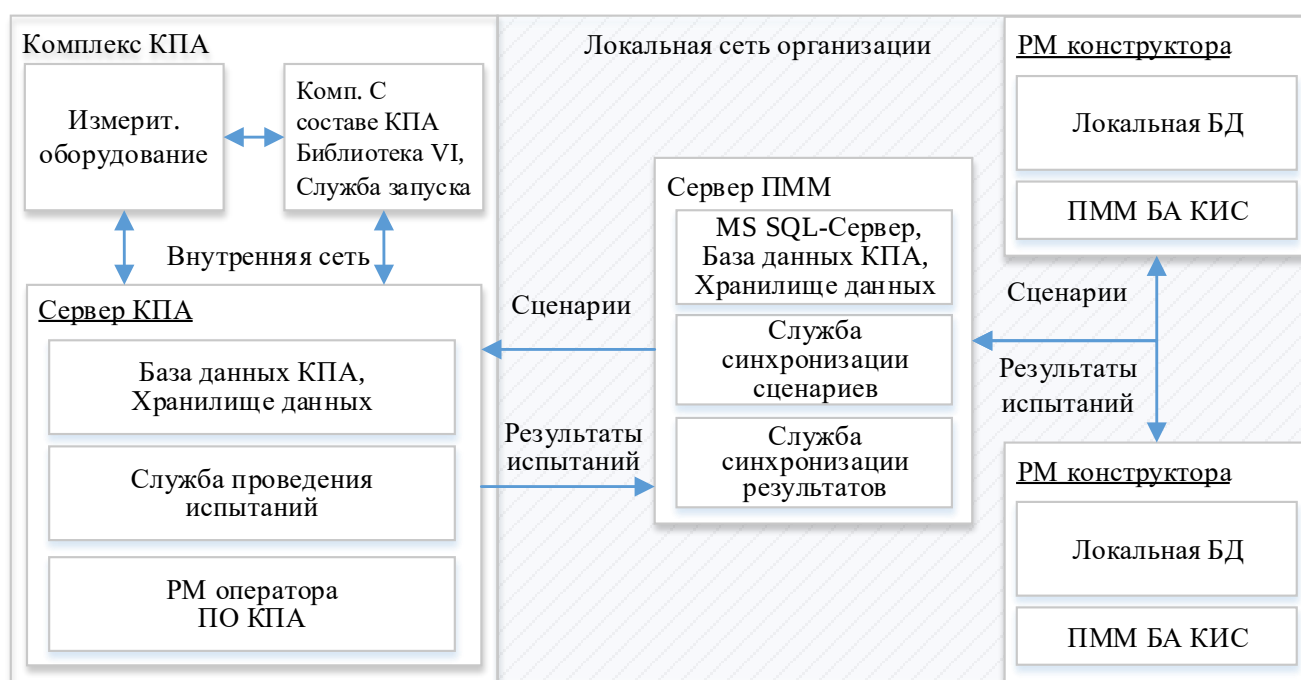


Рисунок 71 – Схема размещения программного обеспечения и баз данных

Для обеспечения безопасности данных КПА и объекта контроля предусмотрен следующий порядок действий: испытания выполняются во внутренней сети КПА, ПО КПА и базы данных размещены на промышленном сервере, обозначим его «Сервер КПА». Он объединён локальной сетью с компьютеров в стойке КПА, не входящей в локальную сеть организации и предназначенном для запуска вир-

туальных инструментов из библиотеки программ работы с оборудованием. Второй сервер, обозначим его «Сервер ПММ», расположен в локальной сети предприятия. Расположенные на нём службы синхронизации обеспечивают взаимодействие между рабочими местами специалистов и базами данных на сервере КПА. В процессе проведения испытаний ПО КПА получает результаты испытаний и данные от оборудования КПА.

Выполнено проектирование инструментов анализа и визуализации данных, которые обеспечивают контроль результатов на основе эталонных критериев, формирование реакций при выходе за граничные условия, сохранение результатов и генерацию отчётов. Создана спецификация на функции программного обеспечения (Таблица 6).

Таблица 6 – Программные функции поддержки испытаний

№	Наименование подсистемы	Автоматизируемые функции	Результаты работы
1.	Подсистема ведения баз данных	Обеспечение взаимодействия всех подсистем для ведения баз моделей, сценариев, пакетов данных.	Базы моделей, сценариев, пакетов данных.
2.	Подсистема ведения спецификации КИС	Ввод допустимых значений параметров функционирования оборудования БА КИС	База данных со значениями параметров.
3.	Подсистема подготовки сценариев испытаний	1. Визуальное формирование графического представления заданий на выполнение испытаний. 2. Настройка параметров, условий выполнения, способов отображения данных. 3. Создание сценариев проведения испытаний.	1. Сценарии проведения испытаний. 2. База данных с параметрами испытаний.
4.	Подсистема создания испытательных процедур приёма-передачи команд	1. Заполнение параметров испытаний командно-программного управления БА КИС. 2. Заполнение критериев контроля прохождения команд. 3. Сохранение испытательных процедур.	Испытательные процедуры
5.	Подсистема генерации испытательных процедур	1. Выбор команд для испытаний. 2. Заполнение параметров испытаний из правил базы знаний.	Испытательные процедуры

№	Наименование подсистемы	Автоматизируемые функции	Результаты работы
6.	Подсистема проведения испытаний	1. Анализ сценариев испытаний. 2. Вызов самопроверки оборудования КПА, необходимого для выполнения сценария. 3. Проведение испытаний в соответствии со сценариями. 4. Поддержка испытаний командно-программного управления. 5. Оперативный мониторинг испытаний. 6. Ведение журнала событий. 7. Поддержка терминалов испытательного оборудования.	Журнал испытаний
7.	Подсистема взаимодействия с библиотеками	1. Регистрация программ связи с оборудованием в библиотеке (программы, переменные, параметры). 2. Подключение программ в ПО КПА. 3. Передача параметров в программы работы с оборудованием. 4. Получение данных измерений.	Результаты испытаний
8.	Подсистема визуализации и анализа результатов испытаний	1. Визуализация результатов испытаний. 2. Изменение способа отображения данных. 3. Визуализация сообщений и ошибок испытаний.	Графическое, табличное и текстовое представление результатов
9.	Подсистема ведения хранилища результатов испытаний	1. Сохранение результатов испытаний. 2. Архивирование результатов испытаний в хранилище данных.	Хранилище результатов испытаний. Архив данных
10.	Подсистема формирования отчётов	1. Построение отчётов по результатам испытаний. 2. Выбор данных для отображения. 2. Экспорт отчётов в документ MsWord.	Отчёт по результатам испытаний
11.	Подсистема поддержки комплексных испытаний	1. Получение от АИК транспортных пакетов. 2. Преобразование, квитирование и передача команд в объект контроля. 3. Получение телеметрической информации и передача в АИК.	Результаты испытаний, журналы
12.	Подсистема просмотра данных в архиве испытаний	1. Выбор результатов испытаний из хранилища данных (по прошедшим испытаниям). 2. Визуализация результатов испытаний. 3. Изменение способа отображения данных. 4. Переход по временной шкале испытаний с отображением результатов. 5. Воспроизведение процесса прошедших испытаний.	Визуальное представление результатов испытаний

№	Наименование подсистемы	Автоматизируемые функции	Результаты работы
13.	Подсистема анализа результатов испытаний по прецедентам имитационной модели	1. Поиск прецедентов. 2. Сравнение телеметрии прецедента с телеметрией испытаний. 3. Визуализация правил при совпадении параметров телеметрии.	Правила, описывающие последовательность действий при отработке команд.

Спецификация подсистем и функций программного обеспечения позволила выполнить их реализацию и обеспечила разделение задач между подсистемами и интеграцию информационных и функциональных ресурсов.

6.2. Подготовка испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата

6.2.1. Создание базы данных для подготовки и проведения испытаний

Выполнено проектирование и создание базы данных для подготовки и проведения испытаний. Структура базы содержит справочники: «Оборудование КПА», «Ошибки выполнения действий» и «Программы для взаимодействия с оборудованием КПА» (Рисунок 72). Используются единые механизмы работы с базой данных для всего программного обеспечения. Справочник оборудования КПА предназначен для сбора сведений об оборудовании, его характеристиках и технической документации. Справочник виртуальных инструментов – программ для взаимодействия с оборудованием КПА предназначен для регистрации виртуальных инструментов, которые будут использоваться в качестве действий в сценариях испытаний

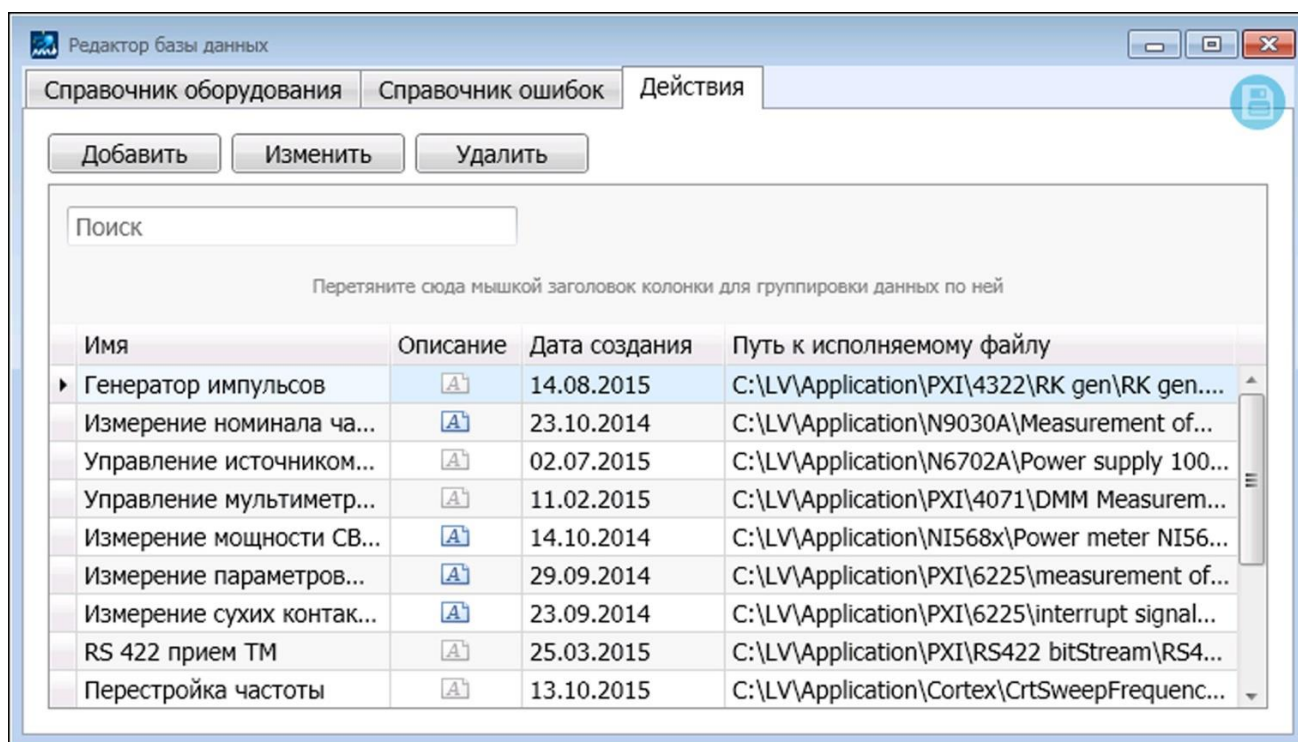


Рисунок 72 – Справочник виртуальных инструментов

Инструменты, зарегистрированные в базе данных, используются при построении сценариев, на этапе подготовки испытаний, при их проведении, а также при просмотре и анализе результатов испытаний. Редактирование справочника реализует расширяемость функций программного обеспечения, дополнение методик испытаний или их изменение.

6.2.2. Графическая реализация сценарного метода подготовки испытаний бортовой аппаратуры

Выполнено проектирование графических инструментов для создания сценариев испытаний, позволяющих выбирать параметры, условия выполнения сценариев и способы отображения данных [312] (Рисунок 73). Реализация подсистемы выполнена в интерактивных графических интерфейсах [63], обеспечивающих удобство работы конструкторов бортовой аппаратуры при подготовке и проведении испытаний. Для интеграции интеллектуальной имитационной модели и инструментов испытаний предлагается спецификации объекта контроля, которая со-

держит перечень испытываемого оборудования, его характеристики и допустимые диапазоны значений.

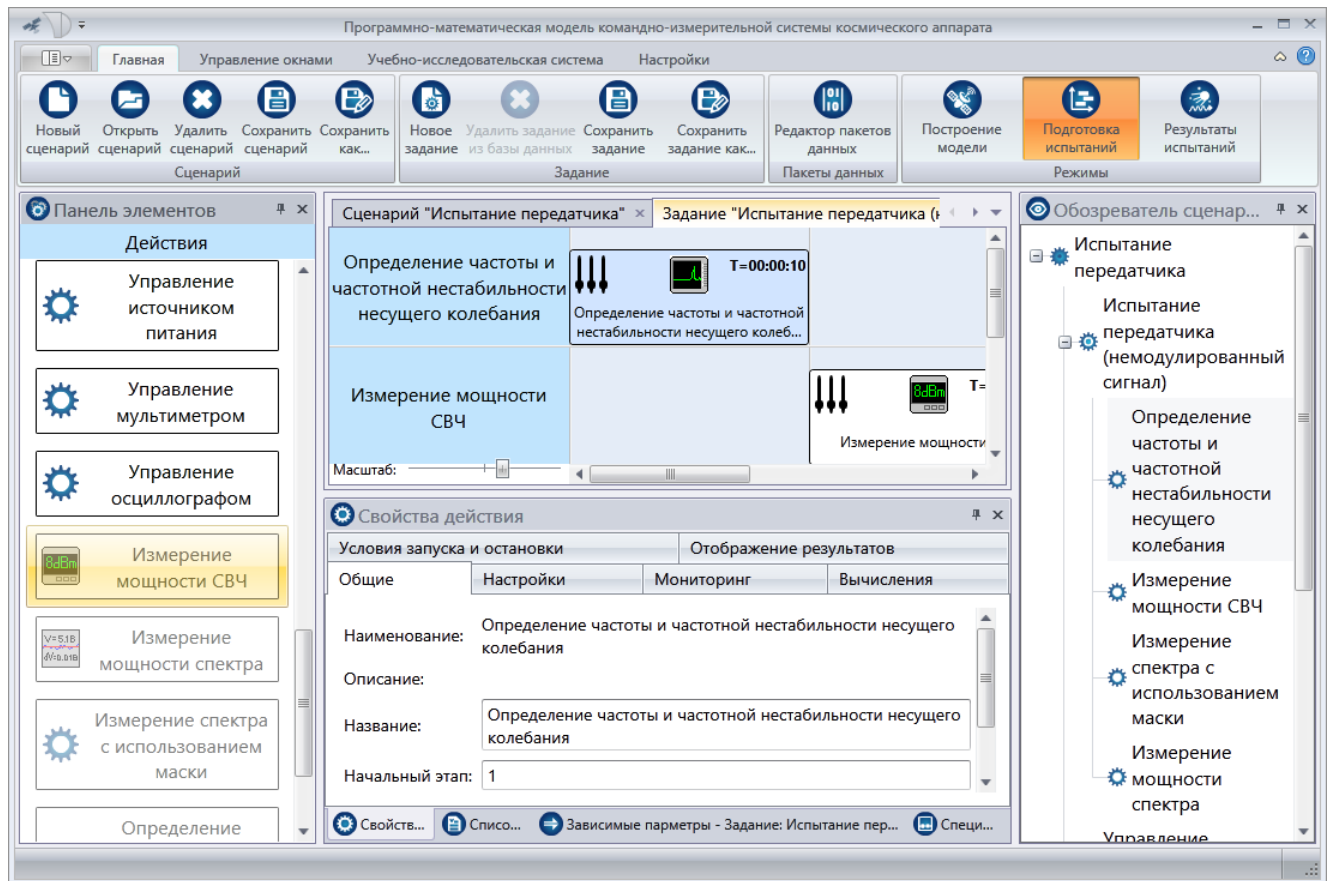


Рисунок 73 – Подсистема формирования сценариев испытаний

Поддерживается поэтапное построение сценария, на начальном этапе из действий строятся задания, на следующем – из заданий собирается сценарий. Структурные компоненты для формирования сценария (действия и задания) визуализируются на панели элементов. Программное обеспечение позволяет выбирать требуемые компоненты и визуально размещать их на панели редактора сценария. Действия представляют собой структурные элементы, описывающие специальные программы работы с оборудованием, реализованные в виде виртуальных приборов. Действия различаются настройками и параметрами запуска-остановки. Условия запуска или остановки действий: запуск действия без условия; запуск или остановка действия с условием по параметрам; остановка при завершении этапа; остановка при завершении выполнения действия и остановка по времени. Условие запуска (остановки) по параметрам определяет правила сравнения параметров с

заданными значениями. Если указано несколько условий, то запуск или остановка действия произойдёт при выполнении хотя бы одного условия.

Для действий могут быть настроены параметры мониторинга результатов испытаний. Задаются минимальное и максимальное значения, область предупреждения, точность отображения результатов, дополнительные вычисления (минимум, среднее, максимум) и способ отображения (значение, график, таблица, индикатор). Поддерживается группировка параметров мониторинга для совместного анализа и отображения. Предложены способы отображения всех наблюдаемых параметров, выполняется их группировка и компоновка графических элементов в окне просмотра результатов. Такие конструкции сохраняются базе данных в виде отдельных заданий, из которых в дальнейшем, визуально на панели редактора строятся сценарии.

Для заданий определяется режим их выполнения (цикличность). Изменение значений цикла производится последовательно для каждого параметра. В качестве параметров можно задать перечень пакетов данных, которые необходимо передать. Задание выполняется до тех пор, пока не переданы все пакеты данных, указанные в перечне. Для действий в заданиях определены зависимые параметры. Зависимости задаются либо между действиями нескольких заданий, либо для действий одного задания. Зависимость означает, что во время выполнения задания значение параметров, указанных в качестве источника, передаётся в параметры, выбранные приёмниками данных.

Предлагается графический обозреватель для просмотра и навигации по сценариям испытаний, который в иерархической структуре показывает сценарий (верхний уровень), перечень заданий и действий, входящих в каждое их заданий.

6.2.3. Подготовка испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата

Для испытаний командно-программного управления применяются цифровые двойники, построенные по технологии интеллектуального имитационного моделирования. Выполнено проектирование инструментов для испытаний командно-

программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата. Результатом проектирования стала подсистема «Проверка команд» [163]. На основе имитационного моделирования выбраны параметры, необходимые для проведения испытаний (Рисунок 74).

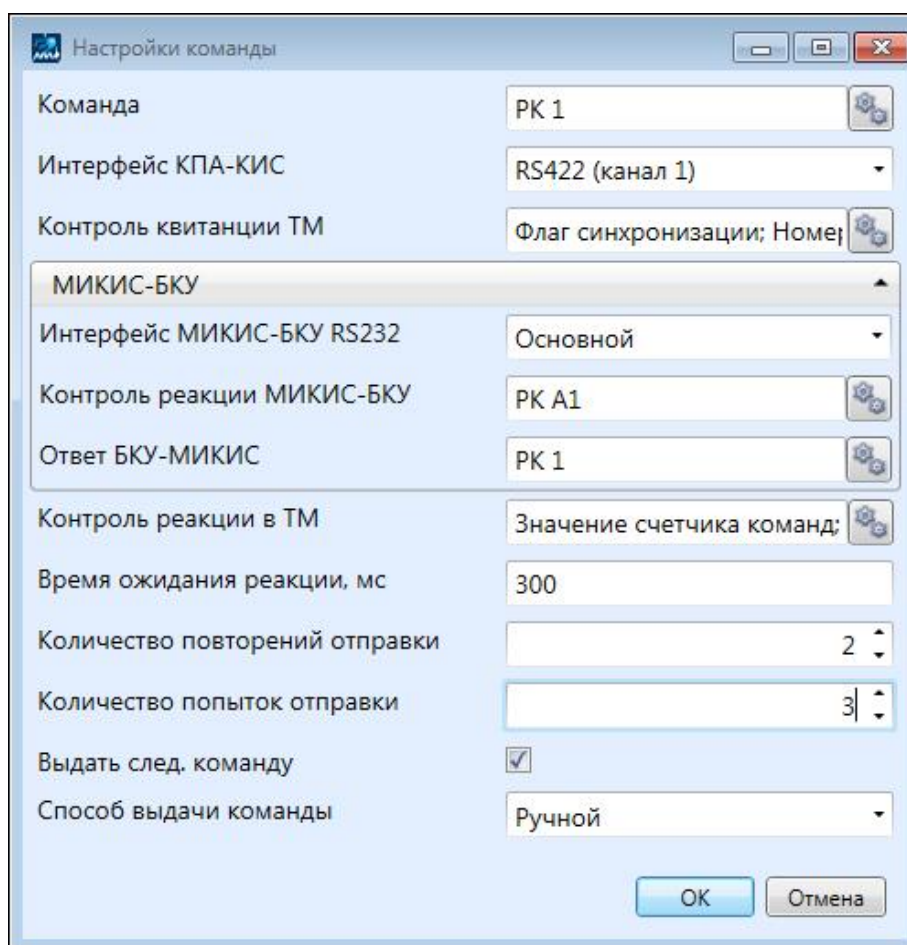


Рисунок 74 – Параметры испытаний для команды

Параметры испытаний: интерфейс (RS-422 первый и второй канал, ВЧ), время ожидания реакции на команду в телеметрии, количество повторений отправки, способ передачи (ручной, автоматический), контролируемые поля и контрольные значения пакета телеметрии. «Команда» – выбирается из базы команд, «Интерфейс КПА-КИС» – указывается интерфейс передачи данных, «Контроль квитанции ТМ» – задаёт поле в телеметрии, в котором проверяется квитанция на получение команды. Блок параметров «МИ КИС-БКУ» предназначен для задания испытания передачи команд РК_{БУ} БКУ. Передача команд от МИ КИС выполняется по RS232 через имитатор последовательных интерфейсов (ИПИ). Задаются парамет-

ры: «Интерфейс МИ КИС-БКУ для RS232», «Контроль реакции МИ КИС-БКУ», «Ответ БКУ-МИ КИС». Параметры для анализа отработки команд: «Контроль реакции в ТМ», «Время ожидания реакции» – время, в течение которого программа проверяет поступающую телеметрию и не переходит к выполнению следующей передачи команды, «Количество попыток отправки» – определяет число передач при неудачной попытке, «Количество повторений отправки» – цикл отправок команды, «Способ выдачи команды» – определяет режим испытаний.

В состав компонент цифрового двойника входит база команд интеллектуальной имитационной модели. Каждая команда описывается строкой в базе команд и набором изменяемых (служебных) полей. Такой подход позволяет сократить список команд, задавая для каждой только уникальные части, и позволяя изменяющиеся части команды выбирать из списков значений.

Выполняется настройка параметров приёма-передающего тракта ВЧ, НЧ, ИПИ для RS-232 и выбор структур данных для приёма и анализа телеметрии. Настройки определяют, как будет работать виртуальный инструмент, реализующий функции передачи данных. Процедуры испытаний командно-программного управления сохраняются в базе данных и используются самостоятельно или в составе сценариев испытаний.

6.2.4. Интеграция метода испытаний командно-программного управления бортовых систем и сценарного метода испытаний

Предлагается интеграция метода испытаний командно-программного управления бортовых систем и сценарного метода испытаний, которая позволит обеспечить анализа физических характеристик функционирования объекта контроля при отправке команд и мониторинг телеметрической информации.

Все необходимые функции собраны в действие «Проверка команд», предназначенное для автоматической передачи команд в рамках выполнения сценария [167]. Действия «Проверка команд» размещаются в сценарии (Рисунок 75).

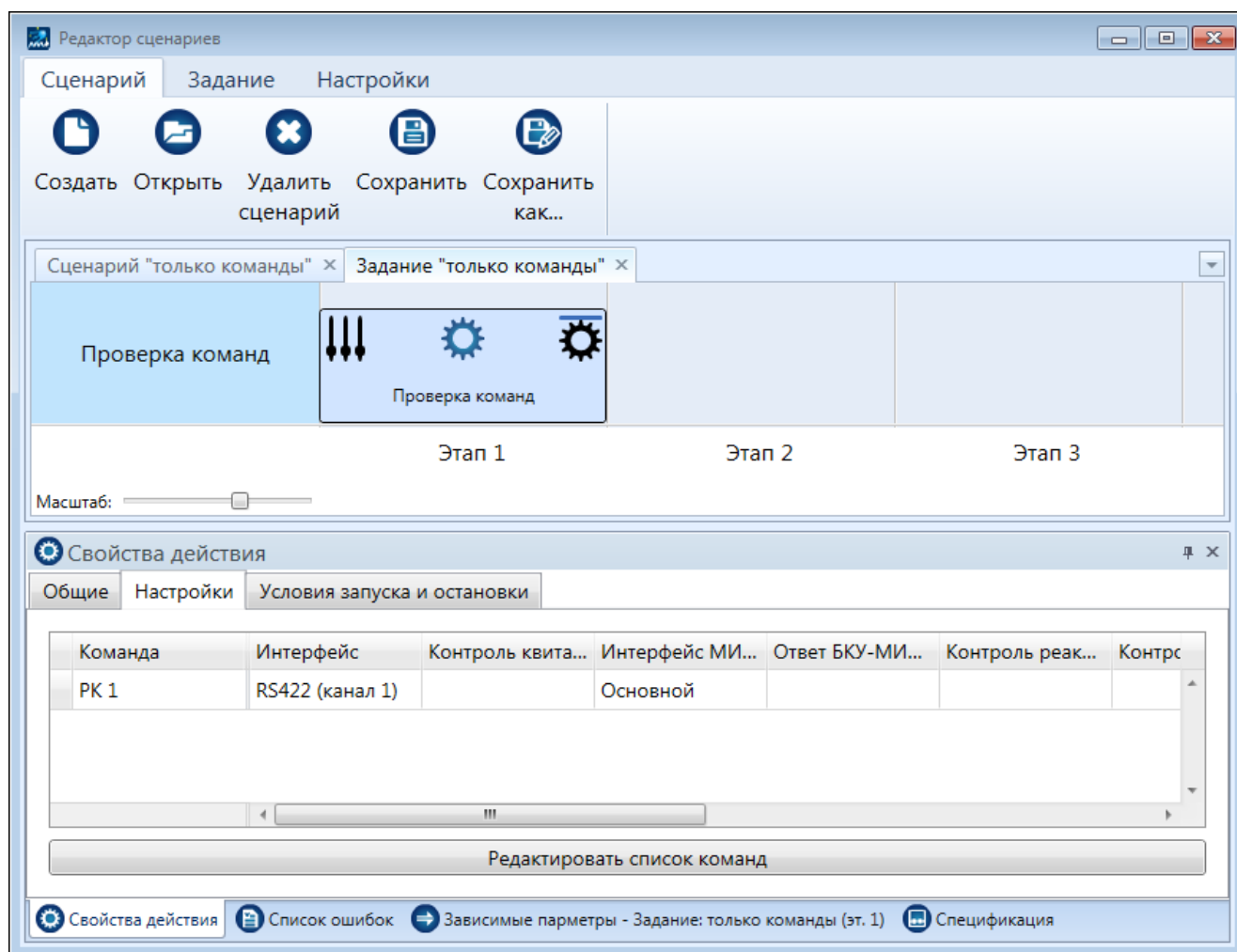


Рисунок 75 – Настройки действия «Проверка команд»

Действие «Проверка команд» может быть добавлено в сценарий вместе с другими действиями, определяющими последовательность измерительных процедур. Настройка параметров выполняется аналогично описанному ранее способу создания процедур испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой. В сценарии можно задать действия по измерению характеристик или управлению оборудованием, которые требуется провести непосредственно перед отправкой команды, в процессе отправки или по её завершении.

6.2.5. Генерация испытательных процедур на основе базы правил имитационной модели

Выполнено проектирование инструмента генерации испытательных процедур, который на основе правил функционирования бортовых систем, описанных в

базе знаний имитационной модели, выбирает параметры и критерии контроля испытаний. В основе метода лежит концепция цифровых двойников, обеспечивающая применение моделей для поддержки испытаний технических систем.

Схематично идея метода генерации испытательных процедур показана на рисунке (Рисунок 76).

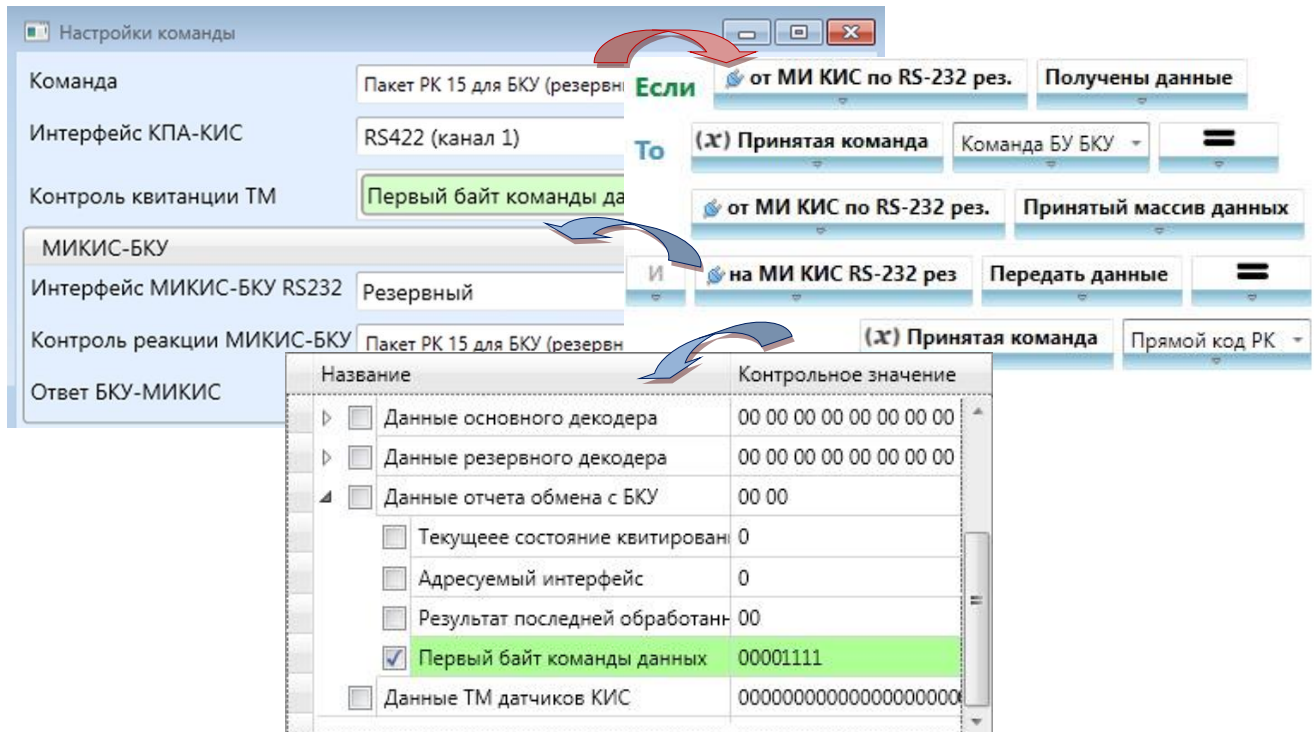


Рисунок 76 – Идея метода генерации испытательных процедур

Имитационная модель отражает функции бортового оборудования при командно-программном управлении космическим аппаратом. Инженер-конструктор, создавая имитационную модель, проводит с ней эксперименты, выполняя изменение состояния элементов модели, параметров приёма и передачи сигналов, времени ожидания ответов и квитанций. Построенные в имитационной модели сценарии передачи команд управления бортовой аппаратурой космического аппарата, структуры пакетов данных телекоманд и телеметрии и критерии оценки функционирования бортовых систем являются основой для подготовки автономных испытаний. Метод генерации испытательных процедур строит подмножество правил базы знаний, определяющее порядок работы имитаторов наземных и бортовых систем при моделировании передачи команд. Для каждого

имитатора при испытаниях выполняется заданная последовательность правил. Выбираются правила имитаторов БКУ, МИ КИС и НКУ. Параметры передачи команд и контроля их выполнения, полученные из построенных подмножеств правил, подставляются в процедуры испытаний. После генерации испытательные процедуры дорабатываются специалистом предметной области.

Программное обеспечение позволит автоматически заполнять испытательные процедуры и доопределять параметры, которые не были получены из базы знаний. Представленный подход упрощает подготовку испытаний и позволяет анализировать характеристики исследуемых объектов на программных моделях, а затем формировать на их основе методы испытаний реального оборудования.

6.3. Поддержка проведения испытаний бортовых систем космических аппаратов

6.3.1. Инструменты проведения испытаний и синхронизации данных

Выполнено проектирование инструментов, обеспечивающих управление КПА при проведении испытаний, получение, анализ и визуализацию данных (Рисунок 77). Инструменты обеспечивают получение данных натурных испытаний и их интеграцию с моделями для построения цифровых двойников функционирования бортовых систем.

Предлагается схема синхронизации баз данных, сценариев и результатов испытаний, которая выполняется между серверами, один из которых расположен во внутренней сети, а другой в сети, доступной с рабочих мест специалистов предметной области. Синхронизация выполняется для справочников, ведение которых осуществляется централизованно. Для сценариев испытаний синхронизация подразумевает подготовку их на рабочих местах и перенос на сервер КПА для выполнения оборудованием. При проведении испытаний результаты размещаются на сервере КПА в зависимости от типа измерений либо в базе данных, либо в виде файлов и переносятся на рабочие места конструкторов бортовой аппаратуры при

выполнении синхронизации данных. Таким образом обеспечивается целостность данных, единство справочной информации и сценариев.

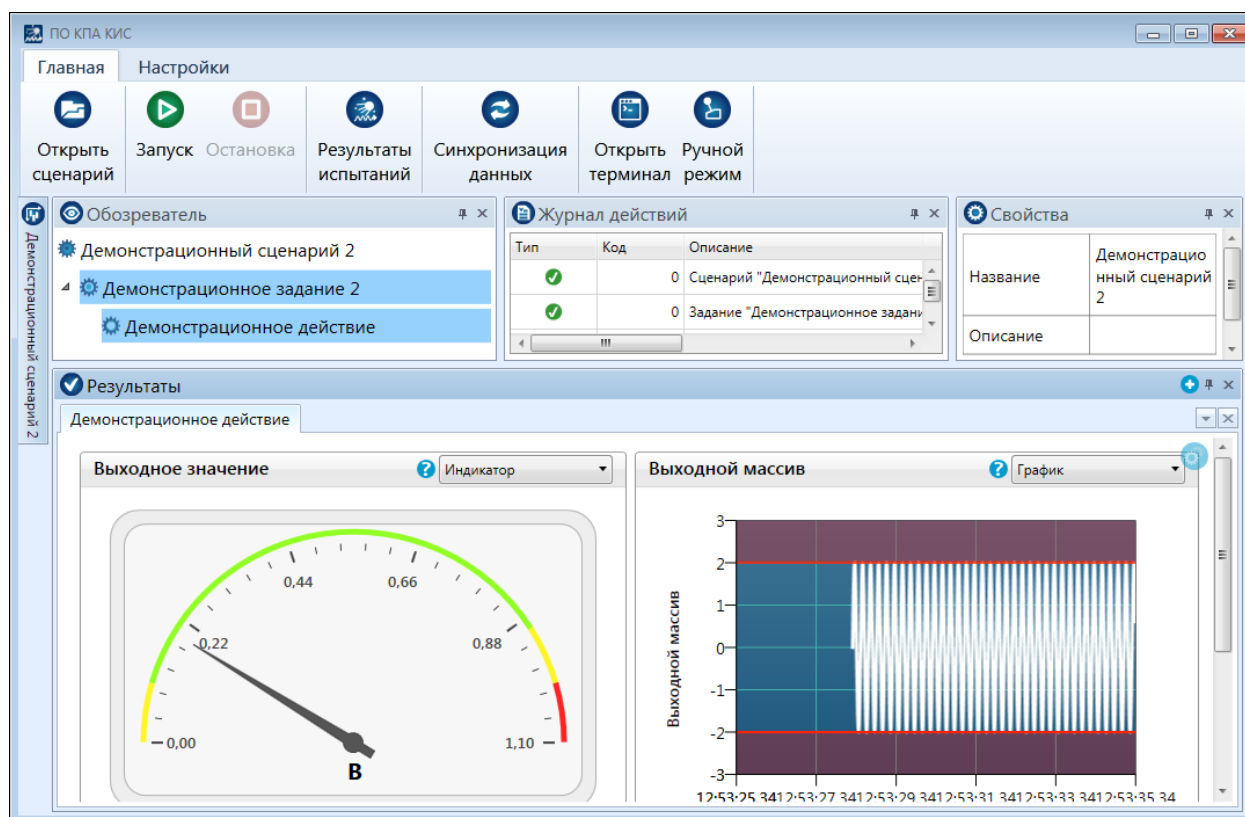


Рисунок 77 – Отображение результатов испытаний

Перед выполнением сценария программное обеспечение анализирует состав оборудования КПА, необходимый для проведения испытаний и вызывает его самопроверку. Результатом проверки является перечень ошибок и предупреждений. В случае успешного завершения проверки программное обеспечение анализирует порядок выполнения действий в сценарии и передаёт входные данные и настройки в виртуальные инструменты, реализующие взаимодействие с испытательным оборудованием КПА [303].

Выполняется контроль поступающих данных на заданные граничные условия и остановка испытаний при выходе результатов измерений за границы. Для контроля используются цифровые двойники, которые содержат спецификации на разрабатываемые устройства, созданные при их проектировании в интеллектуальной имитационной модели.

Все события, возникающие в процессе проведения испытаний, протоколируются в журнале: завершение сценария, задания или действия; ошибки выполнения сценария, предупреждения, результаты самопроверки оборудования КПА. Информация о выполняемых шагах сценария приводится нарастающим итогом и содержит: тип, код, описание, источник события и время.

6.3.2. Мониторинг телеметрической информации

Выполнено проектирование программного инструмента, предназначенного для мониторинга телеметрической информации [197], поступающей от объекта контроля. Интероперабельность данной функции обеспечивается инструментами загрузки структур и параметров мониторинга из файлов. Инструмент позволит выполнять визуализацию и анализ телеметрии, поступающей по основному, резервному каналу (НЧ 1 и НЧ 2) и по каналу ВЧ, выполнять запись в хранилище данных всех телеметрических кадров. Настройки мониторинга телеметрии выполняются через конфигурационные таблицы MS Excel, формат которых принят на предприятии. Подготовленные в соответствии с заданным обменным форматом таблицы загружаются в базу данных для дальнейшего использования при анализе и визуализации телеметрии. В описании параметров содержатся их наименования, контролируемые диапазоны значений, текстовые ответы, тарифовочные таблицы и формуляры. Если для параметра задано несколько формуляров, то все они отображаются в структуре данных.

Предлагается визуализация телеметрических кадров в шестнадцатеричной системе исчисления и параметров телеметрии БА КИС по данным для передатчика, приёмника и МИ КИС, отчётов БКУ, построенные по подготовленным конструктором формулярам (Рисунок 78).

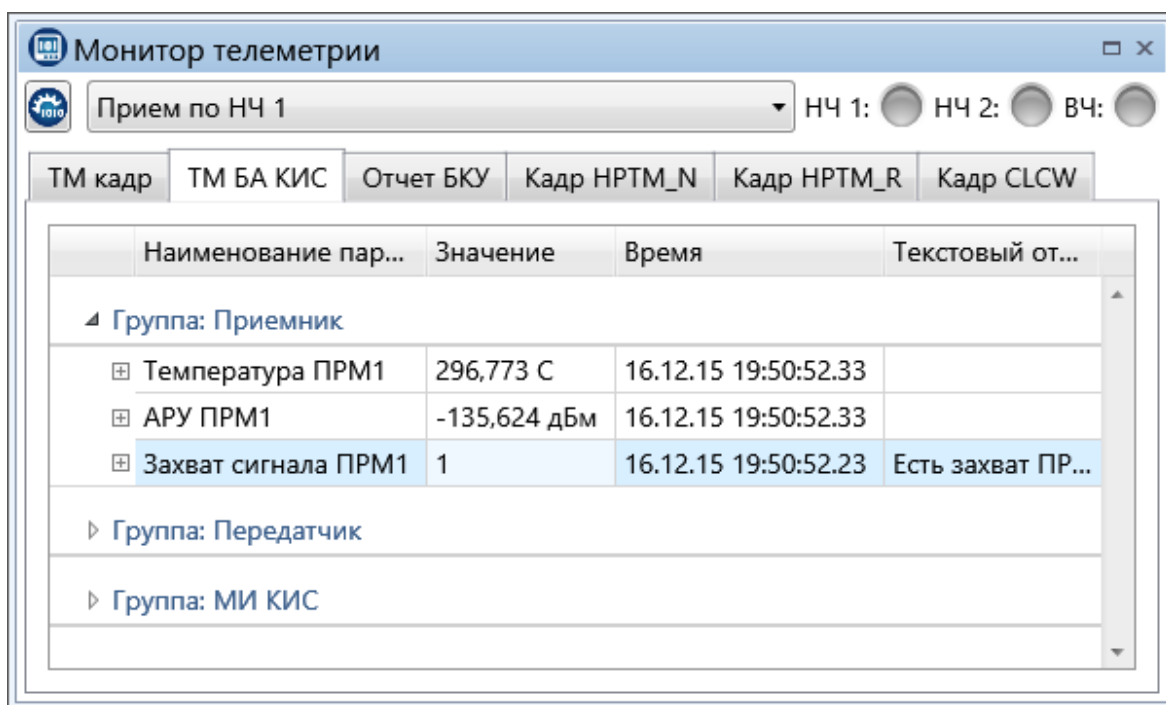


Рисунок 78 – Параметры ТМ БА КИС

Для каждого параметра показывается его значение в двоичном виде, а для значений аналоговых датчиков выполняется их тарировка (перевод показаний приборов в вольты в значения измеряемой величины). Для параметров, для которых заданы граничные условия, смысловые интерпретации результатов отображаются в окне телеметрии (в примере такой параметр – «Захват сигнала ПРМ1»). Выполненное проектирование программных инструментов обеспечивает представление и анализ специализированных структур, описывающих пакеты телеметрической информации.

6.3.3. Испытания командно-программного управления бортовой аппаратурой

Выполнено проектирование программного инструмента – «Проверка команд», предназначенного для испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой [147, 168]. В его задачи входит анализ испытательных процедур, формирование списка команд для испытаний, параметров их передачи и контроля отработки, циклическое выполнение передачи команд и настроек в библиотеку виртуальных приборов, которая работает с КПА. Роль систем окружения

выполняют программные имитаторы. КПА взаимодействуя с объектом контроля получаемые данные передаёт в подсистему «Проверка команд», в которой они визуализируются и сохраняются в хранилище результатов испытаний (Рисунок 79).

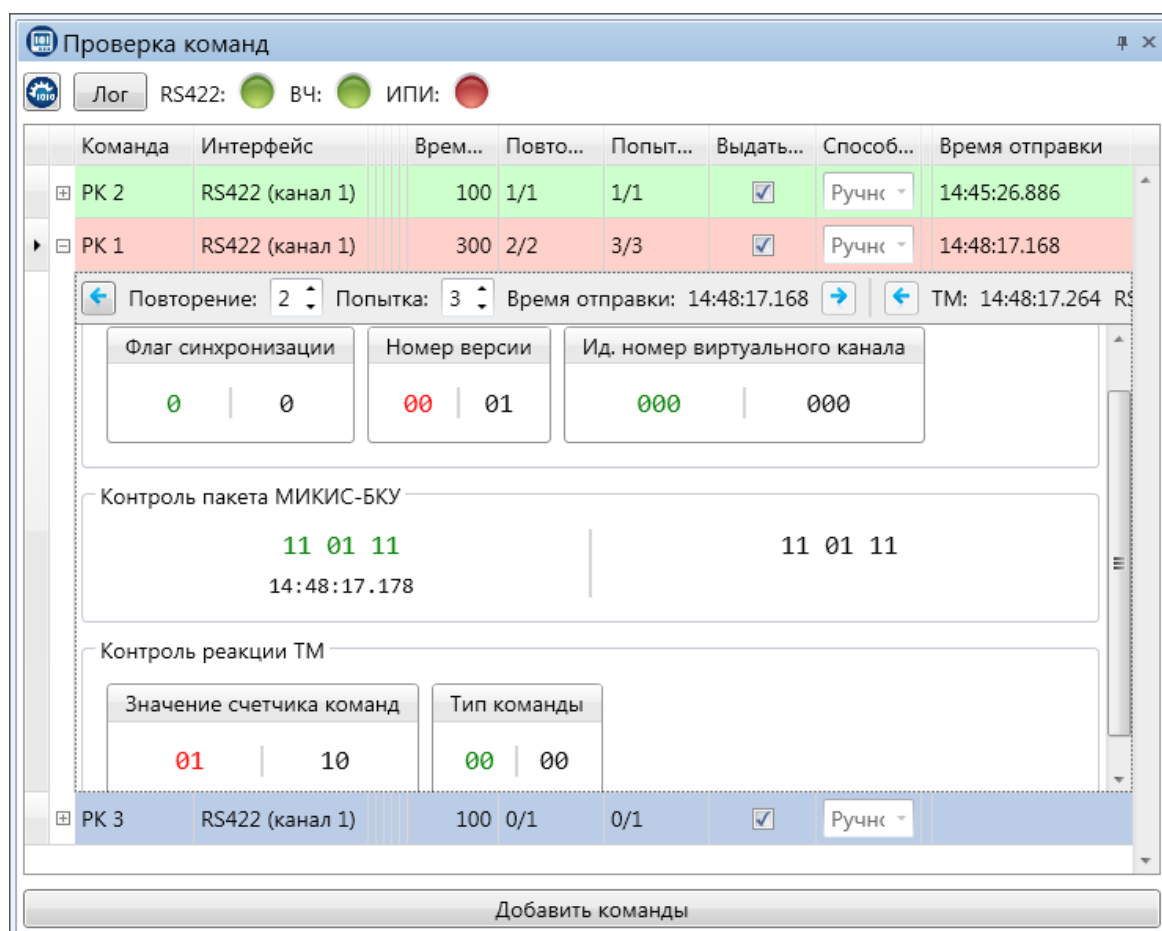


Рисунок 79 – Отображение испытаний «Проверка команд»

При проведении автономных испытаний выполняется имитация работы бортовых систем в части формирования и передачи в объект контроля ответов и квитанций на поступающие команды. Параллельно с отправкой команд выполняется приём пакетов телеметрической информации, которые отображаются в «Мониторе телеметрии». Выполняется анализ получаемой телеметрической информации. Для визуализации предлагается схема показа, включающая условные обозначения и цветовую индикацию [304]. Отображается время отправки команды, время получения реакции в телеметрии, а также контролируемые значения. С помощью программного обеспечения специалист предметной области имеет возможность

получать и анализировать телеметрическую информацию, поступающую в процессе выполнения сценариев или передачи команд.

Контроль параметров телеметрии выполняется для значений, поступающих в двоичном, шестнадцатеричном или в десятичном виде (после тарировки). Если процедуры командно-программного управления являются частью сценария проведения испытаний, порядок их выполнения определяется структурой такого сценария. Как только процесс выполнения сценария доходит до действия «Проверка команд», начинает работать функция испытания команд с заданными параметрами. При проведении испытаний программное обеспечение позволяет изменять или дополнять перечень команд без остановки сценария.

Широкий спектр команд управления и возможных вариантов значений параметров телеметрии затрудняет процесс подготовки испытаний и анализа результатов.

Созданы специализированные программные инструменты, применяющие интеллектуальную имитационную модель для испытаний бортовых систем, что обеспечивает внедрение концепции цифровых двойников в процесс подготовки испытаний.

6.3.4. Анализ результатов испытаний бортовой аппаратуры по прецедентам имитационной модели

Выполнено проектирование инструментов анализа результатов испытаний, получаемых от объекта контроля путём их сопоставления с прецедентами, полученными при моделировании функционирования бортовых систем космического аппарата [308] (Рисунок 80).

Создана структура базы данных для построения и наполнения базы прецедентов. В её состав входят таблицы правил, последовательности их выполнения, параметры телеметрии, зависимости между параметрами и правилами, сведения о состоянии элементов модели, а также пакеты команд и параметров телеметрической информации.

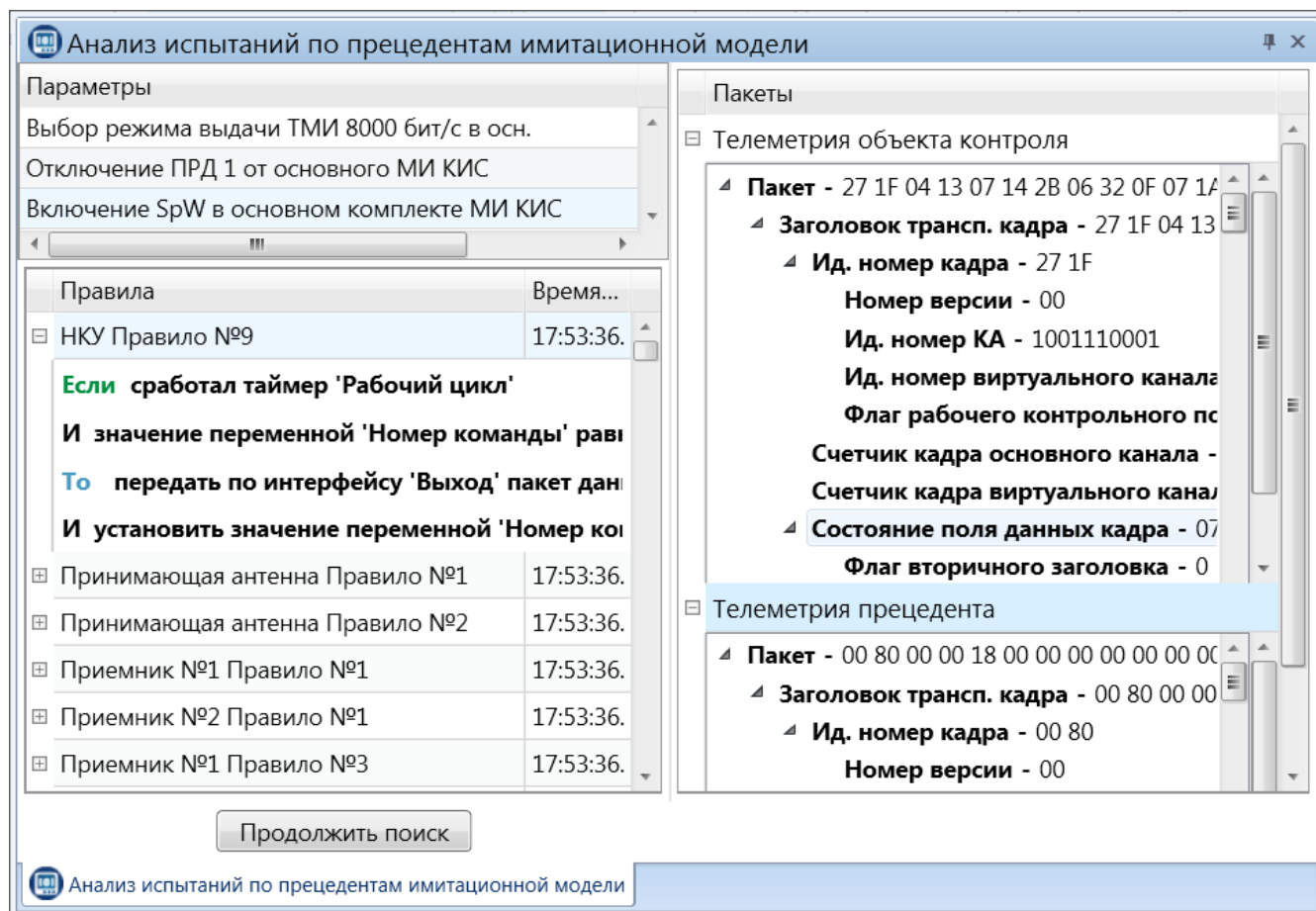


Рисунок 80 – Результаты сравнения телеметрии испытаний и базы прецедентов

Предлагается выполнять поиск и сравнение параметров телеметрии, которые отображают состояние бортовых систем, данные датчиков, настройки приёмо-передающих устройств, работающие комплекты оборудования и пр. При совпадении значений параметров отображаются правила, описывающие действия имитационной модели, которые предшествовали получению телеметрии с соответствующими параметрами.

Сравнение телеметрии бортовых систем с базой прецедентов позволяет рассматривать все возможные изменения параметров, отражённые в имитационной модели, дополнительно к выбранным конструктором контрольным точкам. Данный метод анализа применяется при испытаниях физических характеристик оборудования и логики его работы. Телеметрия поступает с бортовых систем непрерывно, с заданной периодичностью, даже при отсутствии других видов воздействия на объект контроля. Анализ выполняется в фоновом режиме, по поступающей телеметрии обеспечивая непрерывный мониторинг параметров [86].

6.3.5. Поддержка проведения комплексных испытаний

Выполнено проектирование инструментов поддержки комплексных испытаний. Испытания проводятся автоматизированным испытательным комплексом предприятия, работающего как имитатор наземного сегмента. Основной его задачей является передача команд управления на контрольно-проверочную аппаратуру систем космического аппарата, а также приём пакетов телеметрии о состоянии бортовых систем и контрольно-проверочной аппаратуры. Инструменты поддержки комплексных испытаний должны обеспечить взаимодействие объекта контроля и АИК предприятия.

Для поддержки испытаний, ведения журнала событий, сохранения данных, получаемых от объекта контроля и контрольно-проверочной аппаратуры разработана структура базы данных (Рисунок 81) [186]. В структуру входят таблицы, описывающие пакеты данных, квитанции, параметры телеметрии и пр.: «Сеанс работы с АИК» – `dw_AikSession`, «Лог-сообщение» – `dw_AikLog`, «Сообщение ПРОТ» – `dw_AikProt`, «Тип пакета АИК» – `dw_AikPacketType`, «Структура пакета» – `dw_AikPacketStructure`, «Квитанция на АИК» – `dw_AikOutReceipts`, «Принятые пакеты АИК» – `dw_InAikPackets`, «Тип данных адресного параметра» – `dw_ATMParamDataType`, «Адресный параметр» – `dw_AikAtmParameter`, «Значение адресного параметра» – `dw_AikAtmParameterValue`, «МКПИ» – `dw_KPI`, «Сведения отправки фразы МКПИ» – `dw_KPIPhrase`.

Метод поддержки комплексных испытаний обеспечивает взаимодействие АИК предприятия с КПА и объектом контроля [314]. Для проведения испытаний под управлением АИК программное обеспечение КПА выступает в роли сервера и обменивается с ним транспортными пакетами. АИК формирует пакет с командой или массивом КПИ в соответствии со структурой, определённой в транспортном протоколе, и передаёт его в ПО КПА.

Выполнено проектирование программных инструментов, позволяющих получать команды от АИК, их преобразовывать в структуры команд K_{KIC} , K_{BKU} и визуализировать пакеты данных. Значения служебных полей команд формируются в

соответствии с информационным протоколом и с конфигурацией, указанной в параметрах приёмо-передающих функций КПА.

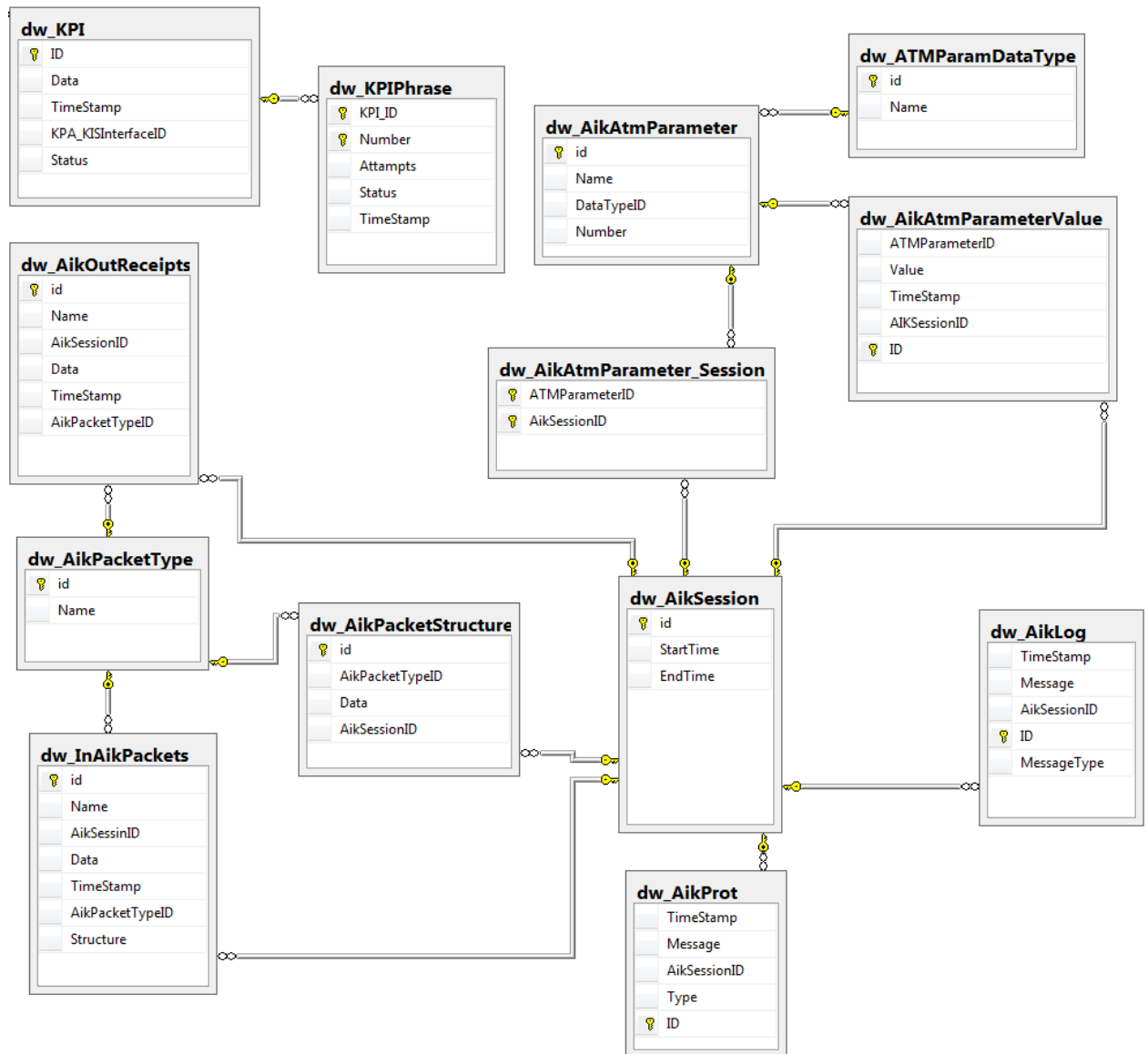


Рисунок 81 – Структура базы данных результатов комплексных испытаний

Поддерживается получение и передача пакетов с массивом командно-программной информации. Информационная часть пакета содержит параметры «Тип МКПИ», «Количество фраз», «Длина фразы» и сам массив данных. Она передается в КПА для закладки в объект контроля. Выполнено проектирование структуры журнала, в котором отображается время выполнения действия и сообщения о получении пакетов команд или МКПИ, формировании квитанций и пр.

Программные инструменты выполняют формирование и отображение адресной и позиционной телеметрии. Адресная телеметрия содержит информацию о

состоянии оборудования КПА, параметры передачи данных от КПА в объект контроля и параметры закладки массивов командно-программной информации. Значения параметров адресной телеметрии изменяются при получении новых данных от КПА. По изменившимся параметрам формируется пакет адресной телеметрии и передаётся в АИК. При его формировании используется принцип сборки из произвольного количества параметров, каждый из которых идентифицируется номером (адресом), записываемым непосредственно в телеметрический кадр. В процессе проведения испытаний ПО КПА принимает телеметрию, передаваемую объектом контроля. Приём телеметрии выполняется по ВЧ и НЧ каналам, скорости приёма настраивается командами от АИК. Телеметрия объекта контроля передаётся в АИК в виде параметра позиционной телеметрии.

6.4. Проектирование инструментов анализа и визуализации результатов испытаний

6.4.1. Просмотр процесса проведения испытаний

Выполнено проектирование инструментов просмотра и анализа данных, получаемых в процессе проведения испытаний или из архивов ранее проведённых испытаний (Рисунок 82). Данные испытаний объединяются с моделями технических систем в цифровых двойниках функционирования бортовой аппаратуры.

Инструменты выполняют навигацию по структуре сценария, действия или задания и времени испытания. Результаты измерений отображаются в соответствии с типом данных и заданной точностью.

Выполнено проектирование графических инструментов для отображения результатов испытаний на графике и в табличном виде. Поддерживается группировка данных и их визуализация в табличном виде, без привязки ко времени получения данных, на графике, с указанием времени и значений измеряемых параметров или зависимости между параметрами, отображаемой на осях графика в наблюдаемых точках.

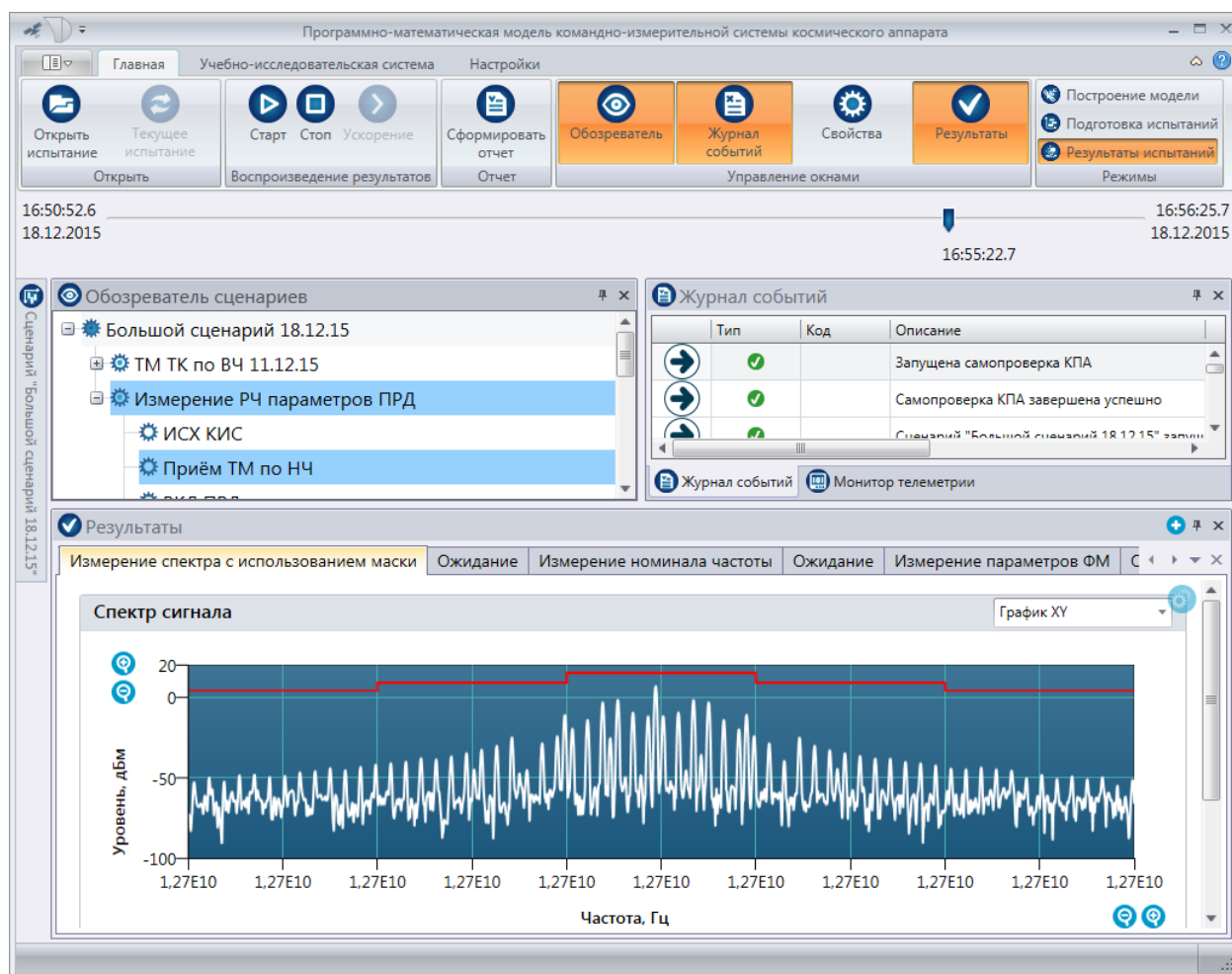


Рисунок 82 – Визуализация результатов испытаний

Предлагается схема индикации отображаемых в элементах визуализации значений цветом, показывающим, что параметр находится в границах допустимых значений, достиг или превысил эту границу.

6.4.2. Просмотр результатов испытаний командно-программного управления

Выполнено проектирование инструментов визуализации испытаний, в сценарии которых входит анализ функционирования бортовой аппаратуры при командно-программном управлении космическим аппаратом. Пример окна для визуализации результатов такого испытания показан на рисунке (Рисунок 83).

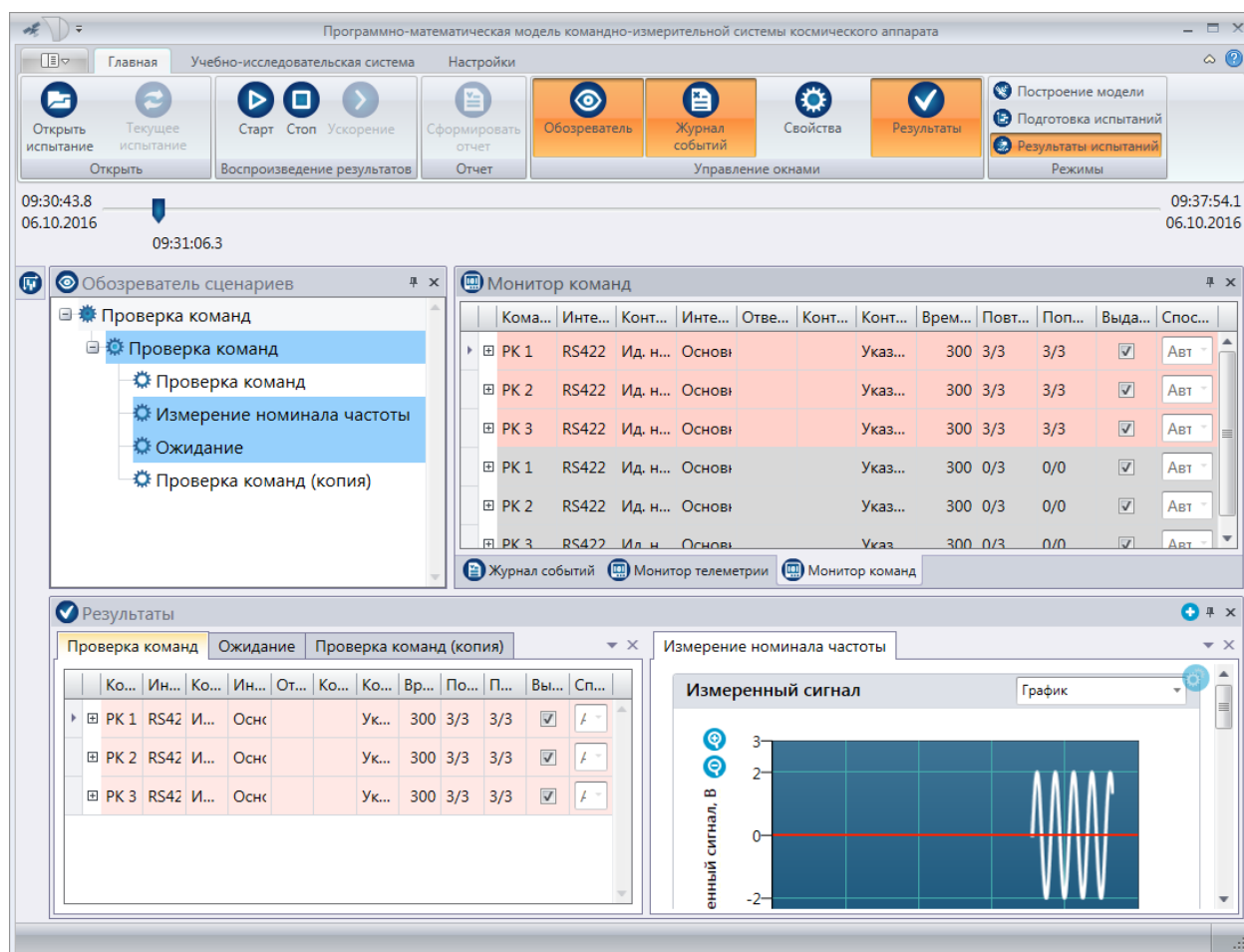


Рисунок 83 – Просмотр результатов проверки команд

Окно содержит «Обозреватель сценариев», «Журнал событий», «Монитор телеметрии», «Монитор команд» и панель «Результаты» с различными вкладками. Поддерживается визуальное перемещение по результатам испытаний, заданное временем, относительно начала испытаний, выбранным действием или командой. Монитор команд представляет собой таблицу, в строках которой перечислены команды, отправленные в процессе проведения испытаний, с детализацией получаемых результатов. Монитор телеметрии синхронизирован с монитором команд. Программное обеспечение позволяет просматривать параметры телеметрии, полученные при различных попытках передачи команд.

6.4.3. Визуализация результатов комплексных испытаний

Предложены инструменты просмотра и анализа результатов комплексных испытаний в ПО КПА в подсистеме «Результаты испытаний». Допускается выбор

результатов текущего испытания или завершённых испытаний, данных по которым размещены в хранилище. Пример отображения результатов комплексных испытаний показан на рисунке (Рисунок 84).

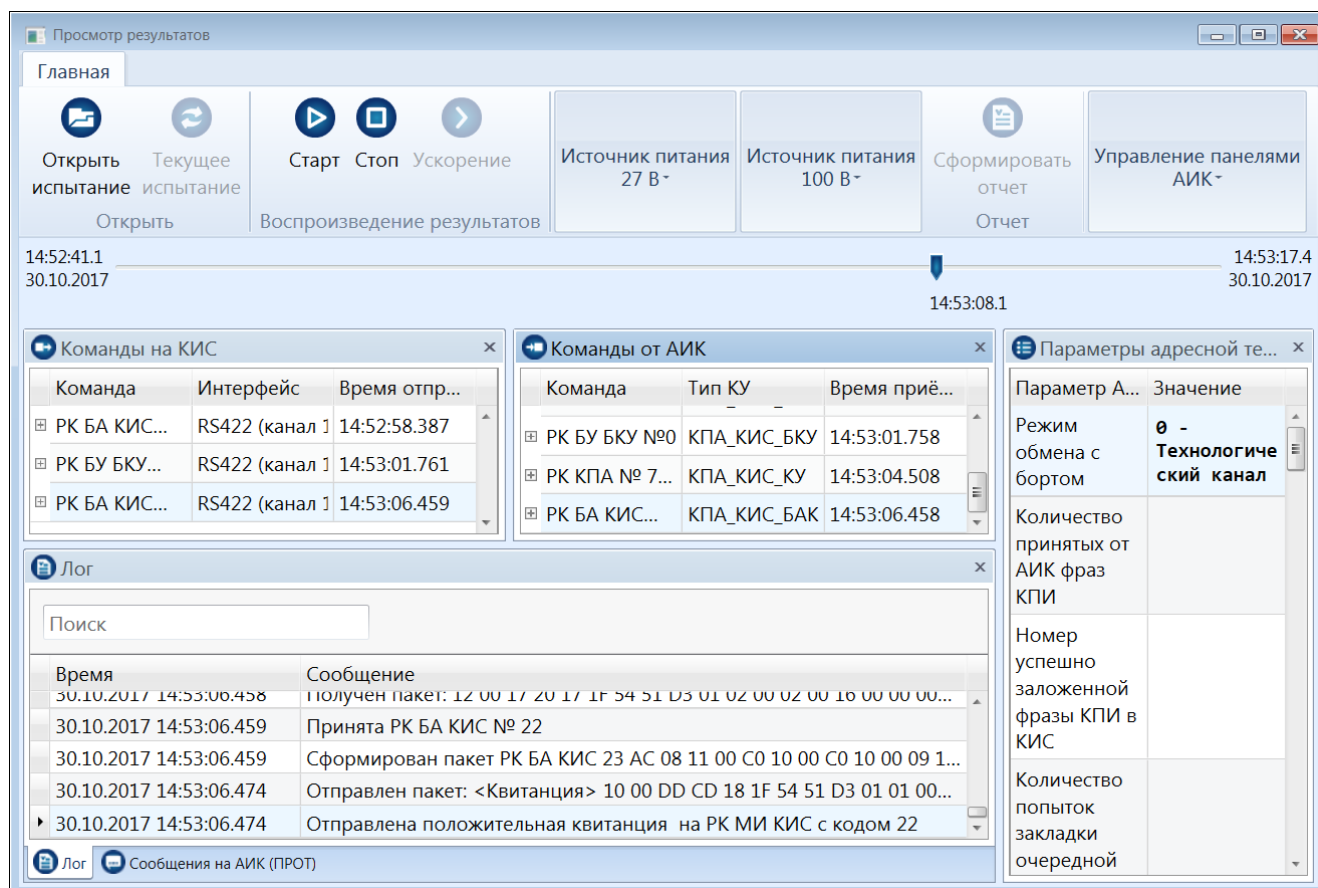


Рисунок 84 – Просмотр испытания

Отображаются: журнал, команды от АИК, команды КИС, сообщения и параметры адресной телеметрии». Изменение точки просмотра результатов выполняется с помощью шкалы времени, которая позволяет отображать события испытания, происходящие в заданное время.

Предлагаются инструменты для построения отчётов по прошедшим испытаниям. В отчёт входит произвольное число параметров действий, для которых задаётся их точность, способ отображения, и указывается необходимость вычисления минимальных, максимальных и средних значений. Предусмотрена возможность просмотра пакетов данных в заданной структуре и добавление в отчёт выбранного пакета либо его части, содержащей заданные показатели. Результатом является документ, включающий все значения параметров испытаний с заданным

способом их отображения. Фрагмент отчёта «Измерение РЧ параметров ПРД» показан на рисунке (Рисунок 85).

Задание: Измерение РЧ параметров ПРД

Начало: 18.12.2015 16:54:36 Окончание: 18.12.2015 16:56:25

Наименование	Значение
Уровень импульса, В	27
Канал	2
Длительность импульса, с	0,15
ПРД 1	23 AC 04 11 00 C0 10 00 C0 10 00 09 15 04 94 73 33 96
ПРД 2	00 00 00 00 00 00 00 00
Включение кодирования ПРД 1	Вкл
Включение кодирования ПРД 2	Вкл
TX Baudrate, Бит/с	1000
Время ожидания, с	5
Частота, Гц	12748500000
Время ожидания, с	5
Начальная частота отображаемого спектра, Гц	12748000000
Конечная частота отображаемого спектра, Гц	12749000000

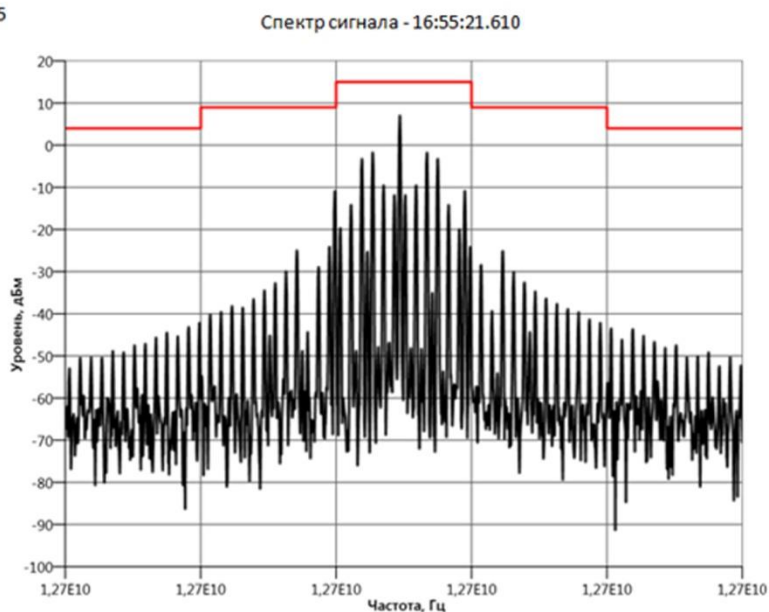


Рисунок 85 – Фрагмент отчёта с результатами испытаний

Расширенные функции построения отчётов с поддержкой выбора фрагментов данных в графическом и табличном виде позволят формировать отчётность по испытаниям в полном объёме.

6.5. Исследование эффективности новой технологии для поддержки проектирования разработки и испытаний бортовых систем

6.5.1. Внедрение новой технологии в производстве бортовой аппаратуры КИС КА

Технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов, реализующая базовые компоненты концепции цифровых двойников, внедрена 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 [170, 216].

Экспертами данного проекта отмечена его существенная роль в развитии космической техники РФ в плане:

- обеспечения всех КА производства АО «ИСС» бортовой аппаратурой КИС собственной разработки;
- снижения финансовых затрат (накладных расходов), т.к. работы по проектированию, испытаниям и интеграции БА КИС будут проводиться специалистами АО «ИСС»;
- снижение трудозатрат вышеперечисленных работ;
- сокращение расходов на КПА, т.к. возможно её использование для нескольких рабочих мест с минимальной перекомплектацией;
- получение экономических преимуществ, т.к. на созданном рабочем месте имеется возможность проводить работы по разработке и испытаниям БА КИС сторонних организаций;
- обеспечение конкурентоспособности, т.к. стандарт БА основан на рекомендациях CCSDS, что позволит использовать разработки ведущих мировых изготовителей приборов;
- достижение независимости от иностранных производителей аппаратуры, которая до введения санкций преимущественно заимствовалась у западных фирм и с введением санкций этот процесс практически заблокирован, а острота потребностей все более нарастает;
- организация образовательного процесса на создаваемом производстве будет способствовать получению студентами и эксплуатационным персоналом навыков работы с БА КИС и приходу на рабочее место предприятий космической отрасли по обслуживанию БА КИС подготовленных специалистов;
- созданная кооперация АО «ИСС», СФУ и ИВМ СО РАН в долгосрочной перспективе способна решать достаточно сложные научно-технические задачи по созданию принципиально новых инновационных изделий.

В указанных преимуществах нового производства командно-измерительных систем существенную роль выполняют проблемно-ориентированные системы - ПММ БА КИС и ПО КПА КИС, построенные на основе технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов, которые решают задачи комплексной поддержки процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры, упрощают и рационализируют действия специалистов предметной области, ориентированы на международные стандарты космической отрасли и, кроме всего прочего, обеспечивают образовательный процесс инструментами поддержки исследовательской деятельности [184, 185].

6.5.2. Оценка среднего времени решения типовых задач конструктором бортовой аппаратуры

Для анализа эффективности новой технологии выполнена оценка среднего времени решения типовых задач конструктором бортовой аппаратуры, возникающих в процессе производства командно-измерительных систем. Проведены эксперименты, показывающие сокращение трудозатрат при применении проблемно-ориентированных систем ПММ БА КИС и ПО КПА КИС по сравнению с использованием существующей на предприятии системы испытаний (АСУИТО) РАСКАТ [16]. Исследования проводились для задачи подготовки и проведения испытаний приёмо-передающих устройств КИС. Специалистом предметной области разработаны циклограммы испытаний в РАСКАТ и созданы сценарии аналогичных методов испытаний в ПО КПА. Зафиксировано уменьшение времени на подготовку испытаний в ПО КПА в среднем на 30%. Экономия времени выявлена при вводе данных испытаний и их проверке: в РАСКАТ выполняется ручной ввод, в ПО КПА автоматическое заполнение из спецификации и автоматический контроль введённых параметров устройств, допустимой коммутации оборудования и ограничений на измерения. На создание и проверку циклограмм у специалиста в РАСКАТ уходит до 17 часов рабочего времени, в ПО КПА подготовка этих испытаний занимает менее 12 часов. Создание спецификации на этапе про-

ектирования оборудования и ведение её на последующих этапах не только сокращает трудозатраты, но и исключает ошибки ввода данных испытаний.

Эксперименты показали, что для ряда задач существующее программное обеспечение РАСКАТ не применяется. Например, испытания с измерением спектра и ГВЗ требуют получения и обработки до 6 ГБ данных в час, с анализом и построением графиков. В ПО КПА такая обработка выполняется автоматически, в РАСКАТ весь объем данных не передаётся, за получаемыми результатами следит оператор, что при длительных испытаниях повышает требования к специализации персонала. Предусмотренный в ПО КПА автоматический контроль сценариев испытаний, автоматический анализ результатов на граничные значения «норма-предупреждение-не норма», автоматический контроль спектра по маске, автоматическая поддержка длительных испытаний дают качественные преимущества по сравнению с применяемой системой испытаний.

При исследовании цифровых интерфейсов КИС в ПО КПА испытание задаётся одним действием, указывающим испытываемый интерфейс, переход на основной или резервный интерфейс (1 и 2 комплекты) определяются по конфигурации модели. В РАСКАТ требуется для каждой команды написать n строк циклограммы для каждого интерфейса, где n числом вариантов резервов и комплектов. Одной из ключевых задач испытаний КИС является проверка метода командно-программного управления. Существующее на предприятии программное обеспечение не позволяет моделировать различные варианты взаимодействия систем. Сложность задачи в том, что изменение одних функций, например, способов передачи команд влечёт изменение в большом числе выполняемых и контролируемых действий. Испытания всевозможных последовательностей команд требует написания $2^{|K|}$ строк в циклограмме, без учёта последовательности их передачи. В ПММ БА КИС позволяет задавать и исследовать эти изменения на модели и применять построенные имитаторы для испытаний бортовых систем.

Далее рассмотрено применение ПММ БА КИС и ПО КПА КИС для построения моделей, и их применение для подготовки и проведения испытаний. В ходе

экспериментов построены модели, отличающиеся сложностью структуры и целевым назначением, и выполнена оценка среднего времени, затраченного на построение моделей методами новой технологии (точки с маркером – ■) и без применения специализированных средств (точки с маркером – ◆). График оценки времени построения моделей показан на рисунке (Рисунок 86). Оси на графике обозначают сложность модели и среднее время (мин), потраченное на построение.

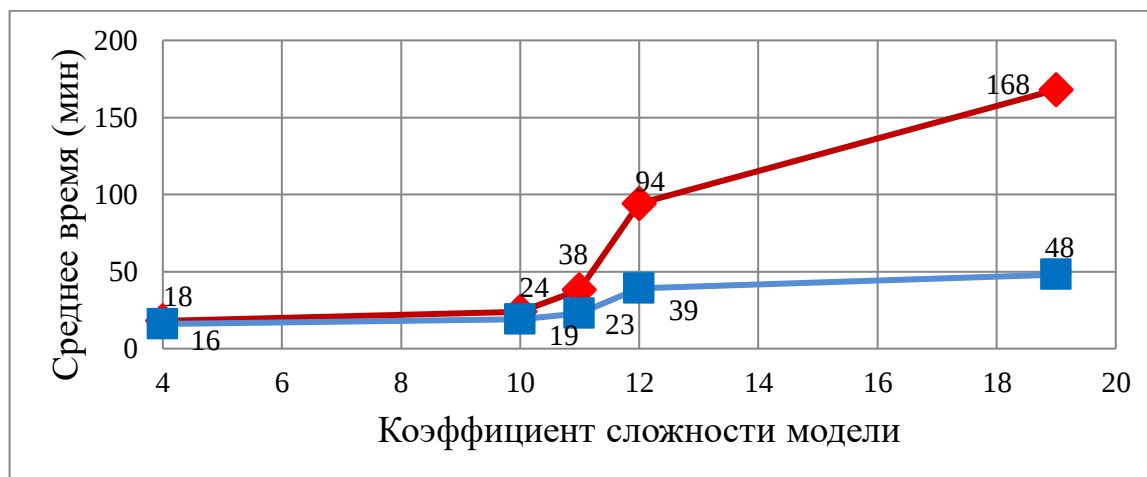


Рисунок 86 – График оценки времени построения моделей

Из графика видно, что при увеличении числа элементов, участвующих в модели, новая технология сокращает трудозатраты специалиста предметной области в среднем на 40 %. Такой эффект достигается за счёт использования специализированных структур данных и шаблонов, а также методов формирования правил базы знаний на основе программ испытаний бортовой аппаратуры.

К типовым задачам подготовки и проведения испытаний в ПММ БА КИС и ПО КПА КИС относятся:

1. Создание специализированных структур и пакетов данных: формирование структур пакетов данных для телеметрической информации; формирование структур пакетов данных для РК_{КИС} и РК_{БКУ}; создание базы команд РК_{КИС}; создание базы команд РК_{БКУ};

2. Подготовка испытательных процедур: формирование процедур командно-программного управления для команд РК_{КИС}; формирование процедур командно-программного управления для команд РК_{БКУ}; создание сценариев испытаний;

3. Проведение испытаний и анализ результатов: выделение в структуре телеметрического кадра наблюдаемых параметров на основе формуляров; анализ параметров отработки команд;

4. Визуализация и контроль: расширенные способы визуализации, выбор фрагментов данных для отчёта; навигация по времени по результатам испытаний; анализ параметров отработки команд.

Выполнена оценка среднего времени, затраченного на решение типовых задач подготовки и проведения испытаний методами новой технологии – ■ и без применения специализированных средств – ■ . График оценки времени показан на рисунке (Рисунок 87).

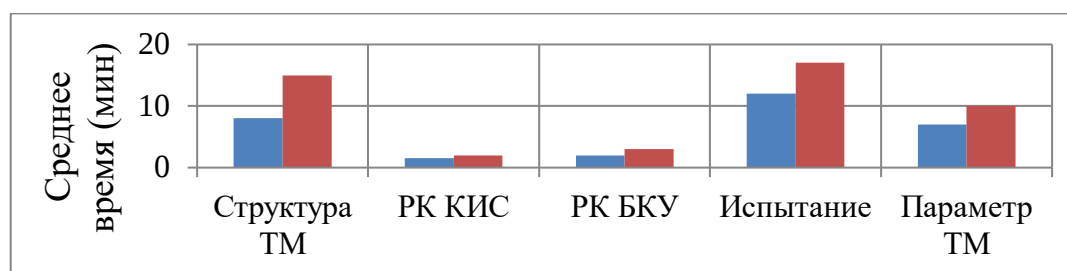


Рисунок 87 – График оценки времени выполнения задач

Оси на графике обозначают задачи: создание структуры телеметрии, введение команды РК_{КИС}, введение команды РК_{БКУ}, создание одного действия испытательной процедуры, выбор параметров контроля телеметрии и среднее время (мин), потраченное на решение задач.

Из проведённой оценки видно, что применение новых подходов и методов позволяет сократить трудозатраты для отдельных задач в 2–5 раз, в среднем сокращение времени достигает 30 %. Такой эффект достигается за счёт специализированных инструментов, упрощающих подготовку данных, включая построение структур из шаблонов, загрузку из Excel команд, формуляров для контроля, генерацию испытательных процедур на основе базы правил имитационной модели и анализ по прецедентам. Ввиду большого числа команд (16 – РККИС, 256 – РКБКУ) и необходимости их определения и испытания для основного и резервного

комплектов, совокупное время решения задач увеличивается пропорционально объёму данных.

Новая технология обеспечивает информационную преемственность данных, структуры пакетов и база команд, созданные для моделирования бортовой аппаратуры, используются для подготовки и проведения автономных и комплексных испытаний. Удобные механизмы формирования сценариев, поддержка повторного использования элементов сценария и включение в сценарий испытательных процедур проверки команд упрощают процесс подготовки испытаний. Для послеаналитического анализа новая технология содержит развитые механизмы визуализации данных с навигацией по времени, по функциям сценария, по событию журнала испытаний, по связанным данным.

6.5.3. Оценка методом анализа иерархий функциональных характеристик новой технологии

Для обоснования эффективности применения новой технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем для поддержки проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры рассмотрены существующие методы и подходы к оценке эффективности внедрения программного обеспечения. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 определяет эффективность как соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами. Такое определение не даёт алгоритмической основы для проведения анализа. Более развёрнутое определение приведено в работах [19, 72], где эффективность понимается как комплексная характеристика системы, отражающая степень её соответствия потребностям и интересам заказчиков, пользователей и других заинтересованных лиц.

Классические методы оценки эффективности ИТ-проектов рассматривают экономические показатели, определяющие отношение совокупных затрат на разработку, установку, сопровождение и использование программного обеспечения к получаемой прибыли [11]. Для сравнения доходной и затратной части используют показатели чистого дисконтированного дохода (Net Present Value), индекса рента-

бельности инвестиций (Profitability Index), внутренней нормы окупаемости (Internal Rate of Return) [34] и др. Однако если затратную часть для построения оценок выделить возможно, то оценить эффект от внедрения информационных систем – уже затруднительно. Как отмечено в работе [34] использование информационных технологий не приносит прямых преимуществ, а только создает условия для их получения за счёт улучшения рабочих процессов. Отсутствует прямое соответствие между конечными финансово-экономическими выгодами и качественными улучшениями за счёт внедрения информационных технологий. Как следует из исследовательского отчёта Panorama Consulting Solutions [321], представляющего оценку современных тенденций внедрения и использования программного обеспечения для предприятий, наиболее распространёнными выгодами от проектов автоматизации являются: повышение надёжности и доступности информации (32%), уменьшение дублирования потоков данных (6%), снижение трудовых затрат и времени операций (10%). Как отмечено в «Дорожной карте развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» – эффективность применение сквозных технологий на основе цифровых моделей при создании высокотехнологичных продуктов обеспечивает снижение временных, финансовых и иных ресурсных затрат до 10 раз и более. В том числе их применение влечёт: сокращение времени на разработку (производство); сокращение затрат на разработку (производство); достижение принципиально новых потребительских свойств; улучшение качества продукции; обеспечение гибкости производства; возможность внедрения новых бизнес-моделей; увеличение ресурса (срока эксплуатации оборудования, инфраструктуры).

Однако такой качественный эффект трудно перевести в количественную форму. Для оценки нефинансовых показателей эффективности применяются другие методы. Например, метод Balanced Scorecard [11], который рассматривает такие аспекты деятельности, как степень лояльности клиентов, или инновационный потенциал компании, или метод Total Value of Opportunities, в котором оценка ИТ-деятельности ведётся по пяти направлениям: соответствию стратегии бизнеса, воздействию на бизнес-процессы, непосредственной окупаемости, архитектуре и

степени риска. Однако при оценке информационных технологий поддержки сложного наукоёмкого несерийного производства невозможно рассматривать такие проекты как инвестиционные бизнес-стратегии. В работах [10, 178, 182] предложен подход, позволяющий учитывать непрямую выгоду от внедрения программного обеспечения на основе многокритериального ранжирования и выбора альтернатив методом анализа иерархий Саати (the Analytic Hierarchy Process) [325]. Идея метода заключается в построении многоуровневой иерархии путём декомпозиции сложных факторов на составные элементы, разнесения их по различным уровням иерархии с определением величины связи между ними и оценкой влияния каждого на общую цель. В [178] построена иерархическая система оценки значимости автоматизированных решений для поддержки эффективного управления организацией. Данная система оценки взята за основу и адаптирована к задачам поддержки процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем.

Выполнено исследование эффективности применения предложенной технологии методом анализа иерархий. Иерархическая система оценки приведена на рисунке (Рисунок 88). Последовательность исследования:

1. Построение иерархии. На верхнем уровне размещена цель иерархии – *«Обеспечение эффективной поддержки производства БА КА»*. Цель разбивается на частные подцели, определяющие критерии I уровня, заключающиеся в эффективной поддержке производственных процессов – *«Проектирования»*, *«Разработки, автономных испытаний»* и *«Комплексных испытаний»*. Критерии II уровня задаются функциональными показателями, существенными для каждого из этапов. Выделение функциональных показателей и анализ их влияния на обеспечение эффективной поддержки отдельных этапов выполнены при создании новой технологии. В качестве альтернатив выбраны варианты: *«Комплексное применение предложенной технологии»*; *«Частичное применение предложенной технологии»*; *«Применение других существующих решений»*; *«Отсутствие специализированных средств»*.



Рисунок 88 – Иерархическая система оценки предложенной технологии для обеспечения эффективной поддержки производства БА

2. Построение матрицы попарных сравнений для оценки влияния каждого элемента иерархии на элементы уровней, расположенных выше в иерархической систем. Каждый элемент матрицы $a(i, j)$ отражает важность элемента i по сравнению с j по шкале отношений Саати.

3. Расчёт индекса согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС). Индекс согласованности рассчитывается по формуле $ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$, где λ_{max} – максимальное собственное значение, n – размерность матрицы. Отношение согласованности получается путём деления значения ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка. Значение ОС большее 0,1 считается неприемлемым. Устранение несогласованности матриц попарных сравнений.

4. Выбор наилучших альтернатив на основе полученных оценок. Интерпретация результатов.

Для получения оценок выполнено попарное сравнение элементов первого уровня по отношению к их воздействию на общую цель. Сравнение выполняется экспертом на основе анализа отчётов, протоколов приёмо-сдаточных и стыковочных испытаний программно-аппаратного комплекса и привлечения экспертов предметной области. Результаты расчётов матриц попарных сравнений приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Матрица сравнений для критериев I уровня

Эффективная поддержка	Проектирование	Разработка, автономн. испытания	Комплексные испытания	Вектор приоритета
Проектирование	1	1/7	1/5	0,078
Разработка, автономн. испытания	7	1	3	0,487
Комплексные испытания	5	1/3	1	0,435
ИС = 0,0062; ОС = 0,0108				

Оценка степени согласованности данных (0,0108) не выходит за пределы нормы (0,1). Согласно полученным оценкам наибольшую величину приоритета обеспечит поддержка этапа разработки и автономных испытаний.

Анализ влияния элементов иерархии II уровня (функциональных характеристик) на критерии I уровня выполнено при проектировании новой технологии. Требуется провести сравнение альтернатив по отношению к заданным функциональным характеристикам (критериям II уровня иерархии). Для этого выделены характеристики технологических подходов к моделированию в разрезе автоматизации испытаний (Таблица 8). Описание подходов приведено в [131, 228]. Рассмотрены специализированные свойства, которые бы могли обеспечить поддержку производства. Приведённые в таблице характеристики позволяют сделать вывод об обеспечении в рассматриваемых подходах критериев *функциональности* (пп. 1-4, 9-10); *комплексность* (пп. 4, 8-10); *автоматизируемости* (исследована в р. 6.1); *информативности* (пп. 2-3, 9-10); *гибкости* (пп. 5, 8); *интероперабельно-*

сти (пп. 8, 10); эргономичности (пп. 1, 4, 9); наглядности (пп. 1, 6-7, 9-10); сопровождаемости (п. 11) и др.

Таблица 8 – Характеристики, существенные для решения задач проектирования и испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата

№ пп	Характеристики	MatLab Simulink	AnyLogik	SMP2: SimTG, SimSAT, GenSim	Предлагаемая технология
1)	Графические инструменты	Инструменты построения блок-схем не позволяют построить структуру БА КИС	Возможно создание графического отображения структуры БА КИС	Как правило, UML, сложно передать структуру БА КИС	Модель строится из блоков и отражает архитектуру БА КИС
2)	Применение терминов предметной области	Требуется настройка	Требуется настройка	Требуется настройка системных терминов.	Основные термины заложены в систему
3)	Поддержка работы со специализированными типами данных: ТМ, МКПИ, РК	Нет	Нет	Требуется программирование на C++	Да
4)	Задание методов моделирования	MATLAB	Язык AnyLogic	Программирование на языке C++.	Описание функций в виде правил на естественном языке.
5)	Возможности быстрой модификации модели	Поддерживается	Требуется перепрограммирование	Программирование на языке C++	Удобные графические инструменты, наглядный интерфейс
6)	Интерактивность процесса моделирования	Поддерживается, интеграция с MatLab даёт дополнительные инструменты	Элементы управления требуют спец. настройки и программирования	В зависимости от реализации модели	Изменение параметров модели, отправка команд, имитация ошибок и выхода из строя оборудования.
7)	Визуализация моделирования	да	да	Определены в модели, не в системе	Анимация модели, визуализация данных
8)	Интеграция со сторонними	Интеграция с готовой мо-	Интеграция через данные	Интеграция на основе стандарта	Интеграция с виртуальными

	моделями	делью		SMP2	приборами
9)	Интеграция с инструментами подготовки и проведения испытаний	Трудоёмко	Трудоёмко	Выполняется при дополнительном программировании	Поддерживается в полном объёме на уровне данных, методов испытаний и методов анализа результатов
10)	Поддержка взаимодействия с автоматизированным испытательным комплексом	Не поддерживается	Не поддерживается	Требуется программирование	Реализована в полном объёме
11)	Уровень квалификации пользователя	Квалификация инженера-конструктора БА КИС и знания по работе с ПО	Квалификация инженера-конструктора БА КИС и знания по работе с ПО	Квалификация конструктора БА КИС; знания по работе с ПО, программирование на C++	Возможность повышения квалификации в исследовательской среде

Результаты попарных сравнений альтернатив по критериям II уровня иерархии представлены в таблице (Таблица 9).

Таблица 9 – Матрица сравнений альтернатив по отношению к их воздействию на критерии II уровня

Альтернативы		1	2	3	4	Вектор приоритета
Функциональность						
1	Применение предложенной технологии	1	2	4	6	0,513
2	Частичное применение предложенной технологии	1/2	1	2	4	0,275
3	Применение других существующих средств	1/4	1/2	1	2	0,138
4	Отсутствие специализированных средств	1/6	1/4	1/2	1	0,074
ИС = 0,0135; ОС = 0,015						
Комплексность						
1	Применение предложенной технологии	1	2	3	7	0,483
2	Частичное применение предложенной технологии	1/2	1	3	5	0,314
3	Применение других существующих средств	1/3	1/3	1	3	0,141

Альтернативы		1	2	3	4	Вектор приоритета
	щих средств					
4	Отсутствие специализированных средств	1/7	1/5	1/3	1	0,059
ИС = 0,0212; ОС = 0,0236						
Автоматизируемость						
1	Применение предложенной технологии	1	3	5	7	0,57
2	Частичное применение предложенной технологии	1/3	1	3	4	0,221
3	Применение других существующих средств	1/5	1/3	1	3	0,119
4	Отсутствие специализированных средств	1/7	1/4	1/3	1	0,059
ИС = 0,0394; ОС = 0,0438						
Информативность						
1	Применение предложенной технологии	1	5	1	7	0,435
2	Частичное применение предложенной технологии	1/5	1	1/3	3	0,124
3	Применение других существующих средств	1	3	1	6	0,383
4	Отсутствие специализированных средств	1/6	1/3	1/6	1	0,058
ИС = 0,0265; ОС = 0,0295						
Гибкость						
1	Применение предложенной технологии	1	2	3	3	0,449
2	Частичное применение предложенной технологии	1/2	1	2	3	0,287
3	Применение других существующих средств	1/3	1/2	1	1	0,139
4	Отсутствие специализированных средств	1/3	1/3	1	1	0,126
ИС = 0,0152; ОС = 0,0169						
Интероперабельность						
1	Применение предложенной технологии	1	3	4	2	0,467
2	Частичное применение предложенной технологии	1/3	1	2	1/2	0,16
3	Применение других существующих средств	1/4	1/2	1	1/3	0,095
4	Отсутствие специализированных средств	1/2	2	3	1	0,278

Альтернативы		1	2	3	4	Вектор приоритета
ИС = 0,0103; ОС = 0,0114						
Эргономичность						
1	Применение предложенной технологии	1	2	3	5	0,484
2	Частичное применение предложенной технологии	1/2	1	2	3	0,229
3	Применение других существующих средств	1/3	1	1	3	0,207
4	Отсутствие специализированных средств	1/5	1/3	1/3	1	0,079
ИС = 0,0113; ОС = 0,0126						
Наглядность						
1	Применение предложенной технологии	1	2	3	5	0,368
2	Частичное применение предложенной технологии	1/2	1	1/2	3	0,193
3	Применение других существующих средств	1	2	1	5	0,368
4	Отсутствие специализированных средств	1/5	1/3	1/5	1	0,07
ИС = 0,0013; ОС = 0,0015						
Сопровождаемость						
1	Применение предложенной технологии	1	2	3	5	0,476
2	Частичное применение предложенной технологии	1/2	1	2	4	0,288
3	Применение других существующих средств	1/3	1/2	1	2	0,155
4	Отсутствие специализированных средств	1/5	1/4	1/2	1	0,081
ИС = 0,007; ОС = 0,0078						

Дальнейший анализ связан с обработкой матриц сравнения. В результате рассчитывается глобальный вектор приоритетов (Таблица 10, Рисунок 88).

Таблица 10 – Итоговые значения глобального приоритета

Критерии	Вектор приоритета	Применение предложенной технологии	Частичное применение предложенной технологии	Применение других существующих средств	Отсутствие специализированных средств
Функциональность	0,169	0,513	0,275	0,138	0,074
Комплексность	0,202	0,483	0,314	0,141	0,059
Автоматизируе-	0,163	0,57	0,221	0,119	0,059

мость					
Информативность	0,110	0,435	0,124	0,383	0,058
Гибкость	0,059	0,449	0,2865	0,139	0,126
Интероперабельность	0,151	0,467	0,16	0,095	0,278
Эргономичность	0,028	0,484	0,2289	0,207	0,079
Наглядность	0,062	0,368	0,193	0,368	0,07
Сопровождаемость	0,057	0,476	0,288	0,155	0,081
Глобальный приоритет	0,485		0,24	0,174	0,1

Выполненные расчёты показали, что альтернатива «Применение предложенной технологии» имеет наибольшую значимость для достижения требуемого результата – обеспечения эффективной поддержки процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата. Наибольший вес среди критериев получили: комплексность (0,202), функциональность (0,169), автоматизируемость (0,163) и интероперабельность (0,151).

6.6. Выводы к главе 6

Выполнено проектирование проблемно-ориентированной системы – ПО КПА КИС, обеспечивающей построение и применение цифровых двойников в технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем при проведении испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. Созданы проектные решения и спецификация на автоматизируемые функции ПО КПА, а также структуры баз данных, которые позволили в полном объёме реализовать предложенные в работе методы и технологии. ПО КПА предназначено для формирования сценариев испытаний, направленных на экспериментальное определение количественных или качественных свойств бортовой аппаратуры командно-измерительной системы при её функционировании. Программное обеспечение объединяет информационные, измерительные, вычислительные и имитационные ресурсы для проведения широкого спектра экспериментальных исследований. Полученные результаты испытаний дополняют цифровые двойники бортовых систем актуальными данными.

Реализация методов поддержки испытаний выполнена на современном технологическом уровне и соответствует передовым тенденциям развития испытательных технологий. Программное обеспечение имеет наглядный интерфейс и удобные инструменты для подготовки и проведения испытаний, обеспечивает работу со специализированными типами данных, синтаксический контроль построения сценариев, расширяемость испытательных инструментов путём интеграции с виртуальными приборами, применение имитаторов взаимодействия бортовых систем с командно-программным управлением. ПО КПА предоставляет настраиваемые графические интерфейсы для визуализации результатов испытаний и обеспечивает протоколируемость процесса проведения испытаний.

Новая технология расширяет сферу применения имитационных моделей и позволяет выполнять анализ данных, получаемых от объекта контроля на основе цифровых двойников, реализованных моделью. Широкий спектр команд и значений параметров телеметрии формирует полную базу прецедентов при проведении имитационных экспериментов. Сопоставление телеметрии прецедентов имитаци-

онного моделирования с результатами испытаний бортовой аппаратуры позволяет выявлять особенности функционирования, которые могли остаться незамеченными при других методах анализа испытаний.

Приведён пример внедрения технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов 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. Новая технология способствует цифровой трансформации производства, сдвигая вектор исследования с натурных испытаний на цифровые модели, что соответствует современной концепции цифровых двойников технических систем. Экспертами проекта создания производства отмечена его существенная роль в развитии космической техники РФ, чему способствуют в том числе и предложенные проблемно-ориентированные системы - ПММ БА КИС и ПО КПА КИС, входящие в состав новой технологии, которые выполняют поддержку процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов.

Выполнен анализ эффективности и целесообразности применения новой технологии для поддержки специалиста предметной области. Показано, что за счёт комплексности предложенных подходов, автоматизируемости ключевых задач конструктора бортовой аппаратуры, обеспечения необходимой функциональности и интероперабельности полученных программных решений новая технология обеспечивает эффективное решение поставленных задач. Проблемно-ориентированные системы обеспечивают сокращение трудозатрат и времени решения типовых задач конструктором бортовой аппаратуры в среднем на 30-40%. Такой эффект достигается за счёт создания моделей функционирования бортовых систем и их применения для подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры, что отражает современные тенденции цифровизации производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований решена научная проблема повышения эффективности высокотехнологичного производства бортовой аппаратуры космического аппарата за счёт новой технологии моделирования и анализа функционирования бортовых систем, обеспечивающей целостный интегрированный подход к решению задач проектирования, разработки и испытаний космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников.

Выводы, научные и практические результаты, полученные автором и представленные в диссертационной работе, заключаются в следующем:

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. Решены задачи: анализ системной проблемы поддержки процессов проектирования, разработки и испытаний бортовых систем космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников; 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 натур-

ных испытаний для моделирования и исследования технических характеристик и методов работы бортовых систем космических аппаратов; 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; разработка методов анализа функционирования бортовых систем, позволяющие применять интеллектуальные имитационные модели для подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов; 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; 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; 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.

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 эффектив-

ности 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 СОКРАЩЕНИЙ

- АИ – автономные испытания;
- АИК – автоматизированный испытательный комплекс;
- АИС – автоматизированная испытательная система;
- АРТ – алгоритм теории адаптивного резонанса;
- АСУИТО – автоматизированная система управления и информационно-телеметрического обеспечения;
- АТМ – адресная телеметрия;
- БА – бортовая аппаратура;
- БА КИС – бортовая аппаратура КИС;
- БАТС – бортовая аппаратура телесигнализации;
- БД – база данных;
- БКУ – бортовой комплекс управления;
- БУ – блок управления;
- БЦВК – бортовой цифровой вычислительный комплекс;
- ВЧ – высокочастотный;
- ГОСТ – государственный стандарт;
- ИПИ – имитатор последовательных интерфейсов;
- ИТНП – режим измерения текущих навигационных параметров
- КА – космический аппарат;
- КИ – комплексные испытания;
- КИА – контрольно-измерительная аппаратура
- КИС – командно-измерительная система;
- КПА – контрольно-проверочная аппаратура;
- КПИ – командно-программная информация;
- МИ – модуль интерфейсный;
- МКО – мультиплексный канал обмена;
- МКПИ – массив командно-программной информации;
- НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа;
- НИР – научно-исследовательская работа;

НКУ – наземный комплекс управления;
НОК – наземный отладочный комплекс;
НС – наземная станция;
НЧ – низкочастотный;
ПММ БА КИС – программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата;
ПО – программное обеспечение;
ПО КПА КИС – программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата;
ПРД – передатчик;
ПРМ – приёмник;
ПТМ – позиционная телеметрия;
РК – радиокоманда;
РМ – рабочее место;
ТМ, ТМИ – телеметрическая информация;
ХД – хранилище данных;
ЦУП – центр управления полётом;
ЭВМ – электронно-вычислительная машина;
BER – bit error rate, коэффициент битовых ошибок;
CAD – computer aided design, средства автоматизированного проектирования;
CAE – computer aided engineering, программы для решения инженерных задач;
CALS – continuous acquisition and life-cycle support, информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий;
CAM – computer aided manufacturing, автоматизированная система технологической подготовки;
CCSDS – consultative committee for space data systems, международный консультативный комитет по космическим системам передачи данных;
CIGI – common image generator interface;
DFD – data flow diagrams, диаграммы потоков данных;

DIS – distributed interactive simulation, стандарт взаимодействия моделей на распределённых системах;

ERD – entity-relationship diagrams, диаграммы «сущность – связь»;

ESA – European space agency, Европейское космическое агентство;

FOM – federation object model;

HLA – high level architecture, архитектура высокого уровня;

MER – modulation error ratio, отношение модуляция/ошибка;

PDM – product data management, управление данными об изделии;

PLM – product lifecycle management, управление изделием на всех стадиях жизненного цикла;

RS-232 – recommended standard 232;

RS-422 – recommended standard 422;

SADT – structured analysis and design technique, методология структурного анализа и проектирования;

SMDL – simulation model definition language, язык описания имитационной модели;

SMP – simulation model portability standard, стандарт переносимости имитационных моделей;

SOMR – simulation-oriented model reuse, технология повторного использования имитационных моделей;

STD – state transition diagrams, диаграммы переходов состояний;

VI – virtual instrument, виртуальный прибор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакаров, А.Ш. Программная система поддержки принятия решений «MPRIORITY 1.0» [Электронный ресурс] / А.Ш. Абакаров, Ю.А. Сушков // Исследовано в России. - 2005. - N 8. - Режим доступа: <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2005/207.pdf>.
2. Аврамчук, Е.Ф. Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.; Под ред. С.В. Емельянова. - М.: Машиностроение, Берлин: Техник, 1988. - 520 с.
3. Автоматизированная испытательная система. Язык программирования Диполь / Т.П. Баранова [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. - 2014. - N 7. - 23 с.
4. Автоматизированная испытательная система. Имитаторы / Т.П. Баранова [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2011. - N 19. - 24 с.
5. Аксенов, К.А. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах: учебное пособие / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. - в 2 ч. Ч. 1. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 104 с.
6. Аксенов, К.А. Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. - Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. - 311 с.
7. Аккужин, М.В. К вопросу о системах компьютерного моделирования / М.В. Аккужин, Р.Ф. Маликов // Труды Пятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». - Санкт-Петербург: ОАО «Центр технологии и судостроения», 2011. - С. 321-324.
8. Александровская, Л.Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская. - М: «Логос», 2003. - 735 с.
9. Андреев, А.М. Алгоритм оценивания пространственной доступности радиоизлучений космических аппаратов командно-ретрансляционных систем с использованием имитационного моделирования / А.М. Андреев, В.О. Хацаюк //

Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. - 2016. - N 650. - С. 57–61.

10. Аникин, И.В. Применение метода анализа иерархий для решения задачи выбора антивирусных продуктов / И.В. Аникин, А.П. Кирпичников // Вестник Казанского технологического университета. - 2014. - N 12. - С. 187-189.

11. Анисифоров, А. Б. Методики оценки эффективности информационных систем и информационных технологий в бизнесе: учебное / А.Б. Анисифоров, Л.О. Анисифорова. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014. - 97 с.

12. Антонов, А.В. Системный анализ: учеб. для вузов / А.В. Антонов. - 3-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2008. - 454 с.

13. Афанасьев, В.А. Экспериментальная отработка летательных аппаратов / В.А. Афанасьев, В.С. Барсуков, М.Я. Гофин и др. - М.: Издательство МАИ, 1994. - 412 с.

14. Ахмедзянов, Д.А. Автоматизация процесса испытания авиационных ГТД на базе SCADA-системы LABVIEW / Д.А. Ахмедзянов, Р.Р. Ямалиев, А.Е. Кишалов // Вестник УГАТУ. - 2009. - N 2 (35). - С. 61-68.

15. Байтеряков, А.В. Разработка малогабаритной бортовой аппаратуры командно-измерительной системы стандарта ESA/CCSDS / А.В. Байтеряков, Д.С. Лучкин, Ю.Г. Тугбаев и др. // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС». – 2017. - С. 134-135.

16. Барков, А.В. Структура проблемно-ориентированного языка испытаний космических аппаратов / А.В. Барков // Вестник СибГАУ им. ак. Решетнёва. - 2006. - N 5(12). - С. 15-18.

17. Батоврин, В.К. Автоматизация измерений и испытаний / В.К. Батоврин, А.С. Бессонов, В.В. Мошкин. - М.: Изд-во МФТИ, 2011. - 128 с.

18. Башмаков, А.И. Разработка компьютерных учебников и обучающих систем / А.И. Башмаков, И.А. Башмаков. - М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 2003. - 616 с.

19. Бекарев, А.В. Методы оценки эффективности внедрения программного обеспечения / А.В. Бекарев, Е.Н. Коновальчикова, Е.Е. Ивашко // Материалы XIII всероссийской науч.-практ. конф. «Цифровые технологии в образовании, науке, обществе». - Петрозаводск, 2019. - С. 26-30.
20. Белевич, А. Контрольно-проверочная аппаратура оптико-электронного телескопического комплекса / А. Белевич, В. Белов, В. Брусиловский // Современные технологии автоматизации. - 2016. - N 3. - С. 44-50.
21. Берман, А.Ф. Модели, знания и опыт для управления техногенной безопасностью / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук // Проблемы управления. - 2010. - N 20. - С. 53-60.
22. Берман, А.Ф. Принципы информационной технологии решения междисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин, А.И. Павлов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2019. - N 2(14). - С.5-15.
23. Берчун, Ю.В. Применение ICOM-подхода для построения имитационных моделей систем / Ю.В. Берчун, П.В. Бурков, О.В. Зудина и др. // Инженерный вестник. – 2016. - N 08. - С. 1001-1007.
24. Бова, В.В. Представление динамических моделей сложных объектов в интеллектуальных обучающих системах / В.В. Бова // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2010. - N 12(113). - С. 219-226.
25. Боев, В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В.Д. Боев. - СПб: БХВ-Петербург, 2004. - 358 с.
26. Борисов, А.Н. Построение интеллектуальных систем, основанных на знаниях, с повторным использованием компонентов / А.Н. Борисов // Systems Open Semantic Technologies for Intelligent Systems. - 2014. - С. 97-102.
27. Боровков, А.И. Типологизация цифровых двойников (Digital Twins) / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, А.А. Гамзикова // Сборник трудов национальной научно-практической конференции с зарубежным участием «Кластеризация цифровой экономики: глобальные вызовы». - СПб: Политех-пресс, 2020. - С. 473-482.

28. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: сборник трудов научно-практической конференции / под ред. А.В. Бабкина. СПб.: Политех-пресс, 2019. С. 234-245.

29. Борщёв А.А. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты [Электронный ресурс] / А.А. Борщёв. - Режим доступа: <http://www.gpss.ru/>.

30. Бровкин, А.Г. Бортовые системы управления космическими аппаратами / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко. - М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. - 304 с.

31. Брукс, Ф.П. Проектирование процесса проектирования / Ф.П. Брукс. - М.: «Вильямс», 2014. - 464 с.

32. Булгаков, Н.Н. Бортовая аппаратура командно-измерительной системы для космических аппаратов ГЛОНАСС: результаты эксплуатации и перспективы развития / Н.Н. Булгаков, В.Г. Алыбин, А.А. Кривошеин, А.С. Семочкин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2014. - Т. 1, вып. 2. - С. 65-73.

33. Василенко, Д.Е. Разработка процедуры контроля непротиворечивости знаний для открытой экспертной системы реального времени / Д.Е. Василенко, Д.Н. Обидин, П.Г. Бердник // Системи обробки інформації. - 2016. - N 9(146). - С. 90-93.

34. Васильева, Е.В. Методы экспертных оценок в прикладной информационной экономике для обоснования преимуществ информационных систем и технологий / Е.В. Васильева, Е.А. Деева // Мир новой экономики. - 2017. N 4. - С. 14-22.

35. Вендров, А.М. Практические рекомендации по освоению и внедрению CASE-средств / А.М. Вендров. - М.: Финансы и статистика, 1998. - 98 с.

36. Вендров, А.М. Современные технологии создания программного обеспечения / А.М. Вендров // Jet Info. - М.: Джет Инфо Паблишер. - 2004. N 4(131). - 32 с.

37. Вергер, А.Е. Разработка формального аппарата для описания циклограммных моделей проведения испытаний и выполнения верификации моделей на корректность / А.Е. Вергер, А.С. Перванюк // Автоматизация в промышленности. - 2011. - N 9. - С. 34-40.

38. Везенов, В.И. Автоматизация наземных испытаний РКН на основе современного архитектурного подхода и новых информационных технологий / В.И. Везенов, О.Г. Светников // Цифровая обработка сигналов. - 2010. - N 3. - С. 3-8.

39. Вогоровский, Р.В. Формализация процессов испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата / Р.В. Вогоровский, Л.Ф. Ноженкова // Образовательные ресурсы и технологии. - 2016. - N 2(14). - С. 131-138.

40. Вогоровский, Р.В. Организация взаимодействия с измерительным оборудованием при проведении испытаний бортовой аппаратуры КА / Р.В. Вогоровский // Молодой ученый. - 2015. - N 11. - С. 22-27.

41. Вогоровский, Р.В. Автоматизация обработки и просмотра результатов испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата / Р.В. Вогоровский // Молодой ученый. - 2016. - N 11. - С. 160-165.

42. Вогоровский, Р.В. Язык сценариев испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата / Р.В. Вогоровский // Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (08–11 нояб. 2017, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. - Красноярск, 2017. Ч. 2. - С. 319-321.

43. Вогоровский, Р.В. Графическая среда построения сценариев испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата / Р.В. Вогоровский // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева (10-14 ноября 2015, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2015. - Ч. 2. - С. 211-213.

44. Воробьев, А. Данилова Л., Игнатов Б., Рындин А., Тучков А., Уткин А., Фертман И., Щеглов Д. Сценарий и механизмы создания единого информацион-

ного пространства / А. Воробьев, Л. Данилова, Б. Игнатов и др. // CADmaster - 2010. - N 5. - С. 48-51.

45. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. - СПб.: Питер, 2001. - 384 с.

46. Гаврилова, Т.А. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем / Т.А. Гаврилова, К.Р. Червинская. - М.: Радио и связь, 1982. - 200 с.

47. Гаврилова, И.В. Имитационное моделирование / И.В. Гаврилова. - Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2016. - 104 с.

48. Головкин, А.В. Методология системного анализа при обосновании перспектив развития космической техники / А.В. Головкин, Б.И. Желтецкий, В.И. Лукьященко и др. // Долгосрочные перспективы космической деятельности России. - 1996. - С. 32-36.

49. Голубев, Е.Н. Развитие и совершенствование методики стендовых испытаний бортового комплекса управления космического аппарата / Е.Н. Голубев, А.О. Николаев // Вестник СибГАУ. - 2013. -N 3(49). - С. 128-132.

50. Голышева, О.С. Комплекс программных средств, предназначенный для испытаний приборов, входящих в состав космического аппарата / О.С. Голышева, А.В. Дунаев // Решетневские чтения: СибГУ им. М.Ф. Решетнева. - Красноярск, 2010. - Ч. 2. - С. 484-485.

51. Горлушкина, Н.Н. Системный анализ и моделирование информационных процессов и систем / Н.Н. Горлушкина. - СПб: Университет ИТМО, 2016. - 120 с.

52. Горчаковский, А.А. Принципы построения автоматизированной контрольно-проверочной аппаратуры космических аппаратов / А.А. Горчаковский, В.В. Евстратько, А.В. Мишуков, С.П. Панько // Исследования наукограда. - 2015. - N 4. - С. 30-32.

53. Горшков, П.С. Моделирование сложной технической системы как объекта испытаний / П.С. Горшков, А.В. Мухин, А.Г. Тригубович // Научный вестник МГТУ ГА. - 2012. - N 185. - С. 61-68.

54. Грищенко, М.А. Применение модельно-управляемого подхода для создания продукционных экспертных систем и баз знаний / М.А. Грищенко, Н.О. Дородных, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин // Искусственный интеллект и принятие решений. - 2016. - N 2. - С. 16-29.

55. Грузенко, Е.А. Графическое имитационное моделирование командно-измерительной системы космического аппарата / Е.А. Грузенко, Р.В. Вогоровский, А.Ю. Колдырев // Материалы XVII международной научной конференции «Решетнёвские чтения». - 2013. - С. 243-245.

56. Гулятьев, А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows / А. Гулятьев. - М.: Корона принт, 1999. - 288 с.

57. Девятков, В.В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: Монография / В.В. Девятков. - М.: ИНФРА-М, 2013. - 448 с.

58. Денисова, И.Ю. Реализация адаптивной технологии обучения в информационной обучающей системе / И.Ю. Денисова, М.В. Баканова // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. - 2012. - N 28. - С. 749-752.

59. Джексон, П. Введение в экспертные системы: Пер. с англ.: Уч. пос. / П. Джексон. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. - 624 с.

60. Джонс, М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях: Пер. с англ. / М.Т. Джонс. - М.: ДМК Пресс, 2013. - 312 с.

61. Евгеньев, Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования: Учеб. пособие / Г.Б. Евгеньев – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. - 334 с.

62. Евстратько, В.В. Разработка модуля обработки полезной полосы / В.В. Евстратько, А.В. Мишуров, А.А. Горчаковский, А.Н. Камышников // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС». - 2017. - С. 53-54.

63. Евсюков, А.А. Разработка интерактивного графического интерфейса для систем поддержки конструирования бортовой аппаратуры / А.А. Евсюков // Решетнёвские чтения. - 2014. - Т. 2. - С. 241-243.

64. Еленев, В.Д. Моделирование процессов функционирования космических аппаратов с использованием сетевых подходов / В.Д Еленев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2004. - N 1. - С. 36-41.

65. Елубаев, С.А. Имитационное моделирование основных компонентов системы управления движением космического аппарата / С.А. Елубаев, Н.К. Джамалов, К.А. Алипбаев и др. // Вестник СибГАУ. - 2013. - N 2(48). - С. 13-18.

66. Емельянов, В.В. Принятие оптимальных решений в интеллектуальных имитационных системах / В.В. Емельянов, В.И. Майорова, Ю.В. Разумцова. - М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 60 с.

67. Есюнин, В.В. Основные принципы построения испытательного стенда бортового комплекса управления для перспективных изделий ОАО «ИСС» / В.В. Есюнин, А.В. Барков // Вестник СибГАУ им. ак. Решетнёва. - 2010. - N 2. - С. 93-96.

68. Жариков, В.Н. Проблемы отработки программного обеспечения бортовой радиоэлектронной аппаратуры / В.Н. Жариков, А.В. Пичкалев // Вестник СибГАУ им. ак. Решетнёва. - 2012. - N 1(41). - С. 15-17.

69. Жихарев, А.Г. Об имитационном моделировании производственно-технологических систем / А.Г Жихарев., К.В. Корчагина, П.А. Бузов и др. // Научный результат. Сер. Информационные технологии. - 2016. - Т.1. N 3(3). - С. 24-31.

70. Загорулько, Ю.А. Разработка системы поддержки принятия решений для нефтегазодобывающего предприятия / Ю.А. Загорулько, Г.Б. Загорулько, А.Ю. Кравченко, Е.А. Сидорова // Труды 12-й национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием. – М.: Физматлит, 2010. - Т.3. - С. 137-145.

71. Замятина, О.М. Моделирование систем / О.М. Замятина. - Томск: Изд-во ТПУ, 2009. - 204 с.

72. Зиндер, Е.З. Методы архитектурного подхода для обеспечения результативности и эффективности электронного правительства: учебное пособие / Е.З. Зиндер. - СПб: НИУ ИТМО, 2013. - 138 с.

73. Зеленцов, В.А. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов / В.А. Зеленцов, А.П. Ковалев, М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Труды СПИИРАН. - 2013. - Вып. 5(28). - С. 7-81.

74. Иосифов, П.А. Проблемы совместного использования различных устройств сбора и передачи данных в составе контрольно-измерительной системы / П.А. Иосифов, А.С. Перванюк, В.А. Шишкин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2012. - N 3 (8). - С. 31-36.

75. 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. doi: 10.26732/j.st.2020.2.05.

76. 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. doi: 1034219/2078-8320-2021-12-4-81-87.

77. 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.

78. 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. DOI: 10.22250/isu.2019.59.46-57.

79. 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. DOI: 10.14489/vkit.2018.10. pp.030-038.

80. 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.

81. Исаева, О.С. Технология построения комплексных моделей в инфраструктуре имитационного моделирования / О.С. Исаева // Информационные технологии. - 2018. - Т. 24, N 7. - С. 474-480. DOI: 10.17587/it.24.474-480.

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

83. Исаева, О.С. Эвристический метод построения модели функционирования командно-измерительной системы космического аппарата / О.С. Исаева, Е.А. Грузенко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2016. - N 4-2. - С. 28-37.

84. 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.

85. 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.

86. Исаева, О.С. Инструменты испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата на основе имитационной модели. Свидетельство об официальной регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2020616059 от 08.06.2020 г. / О.С. Исаева, Л.Ф. Ноженкова, А.Ю. Колдырев // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. - 2020.

87. Исаева, О.С. Интерактивные инфографические инструменты анализа модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Свидетельство об официальной регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2020616060 от 08.06.2020 г. / О.С. Исаева, Л.Ф. Ноженкова, Н.В. Кулясов, С.В.

Исаев // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. - 2020.

88. Искусственный интеллект. В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Поспелова Д.А. - М.: Радио и связь, 1990. - 304 с.

89. Казанцев, Ю.М. Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / Ю.М. Казанцев, Ю.А. Кремзуков // Известия ТПУ. - 2009. - Т. 314, N 4. - С. 138-141.

90. Калянов, Г.Н. CASE структурный системный анализ (автоматизация и применение) / Г.Н. Калянов. - М.: «ЛОРИ», 1996. - 242 с.

91. Карасёв, А.А. Об автоматизированном анализе результатов обработки испытательного программного обеспечения автоматического космического аппарата / А.А. Карасёв // Космическая техника и технологии. - 2016. - N 2(13). - С. 55-61.

92. Карташов, Б.А. Моделирование технических систем в среде ПК «МВТУ» / Б.А. Карташов, О.С. Козлов, И.К. Винников, Литвинов С.Н. // Вестник ДГТУ. - 2009. - N 4 (43). - С. 131-135.

93. Карпов, Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г. Карпов. - СПб: БХВ-Петербург, 2006. - 400 с.

94. Каталевский, Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении / Д.Ю. Каталевский. - М.: Издательский дом «Дело», 2015. - 496 с.

95. Кельтон, В. Имитационное моделирование. 3-е изд. / В. Кельтон, А. Лоу. - СПб.: Питер, 2004. - 847 с.

96. Ключев, Е.А. Управление комплексом испытаний систем космических аппаратов / Е.А. Ключев // Винеровские чтения. - Иркутск. - 2009. - С. 1-17.

97. Князькин, Ю.М. Применение системного анализа при проектировании программных комплексов обработки телеметрической информации / Ю.М. Князькин, К.Б. Шмик, А.Б. Вершинин, М.В. Некрасов // Решетневские чтения. - 2010. - N 14. - С. 150-151.

98. Ковалевич С.А. Сравнение систем автоматизированных испытаний космических аппаратов // Решетневские чтения. 2016. №20, С. 274-275.
99. Колдырев, А.Ю. Формирование заданий в учебно-исследовательской системе конструктора бортовой аппаратуры / А.Ю. Колдырев, Е.А. Грузенко // Образовательные ресурсы и технологии. - 2016. - N 2(14). - С. 30-35.
100. Контрольно-проверочная аппаратура космического аппарата: пат. № 2563925 Рос. Федерация, МПК В64G 5/00, G01R 31/00. № 2014118450/11 / А.А. Горчаковский, В.В. Евстратько, А.В. Мишуров, С.П. Панько и др.; заявл. 06.05.2014; опубл. 27.09.2015.
101. Контрольно-проверочная аппаратура. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.irz.ru/uploads/catalogs/catalog_kpa.pdf.
102. Космынина, Н.А. Языковые и инструментальные средства создания и исполнения сценариев управления космическими аппаратами: автореф. дис. канд. тех. наук. - Железногорск: «Динамит», 2020. - 20 с.
103. Космынина, Н.А. Разработка языка управления космическими аппаратами / Н.А. Космынина Н.А., А.И. Легалов, А.В. Барков, А.А. Лапин // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5 (78). С. 82-90.
104. Космические навигационные и геодезические системы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/vehi/04.html>.
105. Крат, Н.М. Контрольно-проверочная аппаратура системы автономной навигации космических аппаратов / Н.М. Крат, А.А. Савин, Г.С. Шарыгин // Доклады ТУСУР. - 2014. - N 1(31). - С. 28-32.
106. Кувалдина, Т.А. Искусственный интеллект и образовательные технологии: проблемы постановки и проведения методического эксперимента / Т.А. Кувалдина // Материалы конференции «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века». - 2016. - С. 103-106.
107. Кудряшова, Г.В. Применение программных имитаторов при наземной экспериментальной отработке бортовой аппаратуры космических аппаратов / Г.В. Кудряшова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2016. – Т. 1. - С. 627-628.

108. Куренков, В.И. Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Проблемно-ориентированные системы автоматизированного проектирования / В.И. Куренков, А.С. Кучеров - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. - 108 с.

109. Куренков, В.И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учебное пособие / В.И. Куренков, В.В. Салмин, Б.А. Абрамов. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - 296 с.

110. Латышенко, К.П. Автоматизация измерений, контроля и испытаний / К.П. Латышенко. - М.: Издательский центр «Академия», 2012. - 320 с.

111. Лахин, О.И. Теория сложности и проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности / О.И. Лахин, А.С. Полников, Е.В. Симонова, П.О. Скобелев // Информационно-управляющие системы. - 2015. - N 1. - С. 4-12.

112. Лахин, О.И. Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки процессов технического обслуживания и ремонта при эксплуатации изделий аэрокосмической промышленности на основе мультиагентных технологий / О.И. Лахин, Е.В. Симонова, П.О. Скобелев, А.С. Полников, Ю. С. Юрыгина // Информационно-управляющие системы. - 2015. - N 4. - С. 10-16.

113. Липаев, В.В. Системное проектирование сложных программных средств для информационных систем. Издание второе, переработанное и дополненное. Серия «Управление качеством» / В.В. Липаев. - М.: СИНТЕГ, 2002. - 268 с.

114. Литвинов, В.В. Методы построения имитационных систем / В.В. Литвинов, Т.П. Марьянович. - Киев: Наук думка, 1991. - 120 с.

115. Лопаткин, Р.Ю. Перспективы применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управлении технологическими системами / Р.Ю. Лопаткин, С.А. Петров, С.Н. Игнатенко, В.А. Иващенко // Вісник НТУ «ХПІ». - 2015. - N 17(1189). - С. 61-71.

116. Лорьер, Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта: Пер. с франц / Ж.-Л. Лорьер. - М.: Мир, 1991. - 568 с.

117. Лычкина, Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов / Н.Н. Лычкина; под. ред. В.В. Година. - М.: Академия ИТ, 2005. - 165 с.
118. Лычкина, Н.Н. Технологические возможности современных систем моделирования / Н.Н. Лычкина // Банковские технологии. - 2000. - Вып. 9. - С. 60-63.
119. Люггер, Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание.: пер. с англ. / Д.Ф. Люггер. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. - 864 с.
120. Мальцев, Г.Н. Дистанционное зондирование земли на основе кластера малых космических аппаратов многоспектрального наблюдения / Г.Н. Мальцев, В.В. Кунгурцев, И.А. Козин // Изв. вузов. Приборостроение. - 2009. - Т. 52, N 4. - С. 16-22.
121. Массель, Л.В. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике / Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова, Н.И. Пяткова // Онтология проектирования. - 2017. - Т. 7, N 1(23). - С. 66-76.
122. Массель, Л.В. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики / Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова // Онтология проектирования. - 2020. - Т.10, №3(37). - С.327-337.
123. Массель, Л.В. Цифровая трансформация энергетики: методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений / Л.В. Массель, А.Г. Массель // Информационные технологии и системы. - 2019. С. 101-106.
124. Материалы в эскизный проект ПО КПА КИС 4430 ЭП ПЗ ИВМ-002-13. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. - 37 с.
125. Методы исследования сложных систем. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://by-chat.ru/uchjoba/spravochniki/informatika/591-2012-11-03-20-26-27>.
126. Миков, А.И. Опыт использования методов искусственного интеллекта при разработке систем имитации / А.И. Миков, Е.Б. Замятина // Материалы конференции «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века». - 2016. - С. 19-23.

127. Микрин, Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения / Е.А. Микрин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 336 с.

128. Микрин, Е.А. Разработка моделей и методов проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / Е.А. Микрин, В.В. Кульба, Б.В. Павлов // Автоматика и телемеханика. – 2013. – N 3. – С. 38-50.

129. Микрин, Е.А. Принципы построения бортовых комплексов управления автоматических космических аппаратов / Е.А. Микрин, Н.А. Суханов, В.Н. Платонов и др. // Проблемы управления. – 2004. – N 3. – С. 62-66.

130. Миронов, А.Н. Прогнозирование качества функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов в условиях нечеткой информации о границах области работоспособных состояний / А.Н. Миронов, Е.А. Миронов, О.Л. Шестопалова // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – М.: Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. – 2016. – N 4(32). – С. 1-10.

131. Михеева, Т.В. Обзор существующих программных средств имитационного моделирования при исследовании механизмов функционирования и управления производственными системами / Т.В. Михеева // Известия АлтГУ. – 2009. – N 1. – С. 87-90.

132. Молотов, Е.П. Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами / Е.П. Молотов. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.

133. Мостовой, Я.А. Лекции по управлению сложными техническими системами / Я.А. Мостовой. – Самара: ФГБОУ ВПО ПГУТИ, 2014. – 192 с.

134. Муравьева-Витковская, Л.А. Моделирование интеллектуальных систем / Л.А. Муравьева-Витковская. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 145 с.

135. Муромцев, Д.И. Концептуальное моделирование знаний в системе Concept Map / Д.И. Муромцев. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. – 83 с.

136. Мухин, А.В. Математические модели информационно-управляющих систем как объектов испытаний / А.В. Мухин, А.А. Безбогов // Материалы между-

нар. науч. конф «Компьютерное моделирование и информационные технологии в науке, инженерии и образовании». - Пенза: РИО ПГСХА. - 2003. - С. 117-120.

137. Недорезов, Д.А. Разработка программного обеспечения для испытательных комплексов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / Д.А. Недорезов // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. - Новосибирск: ООО «Центр развития научного сотрудничества». - 2012. - N 10-1. - С. 182-187.

138. Недорезов, Д.А. Разработка и внедрение специального программного обеспечения для лабораторных отработочных комплексов испытаний радиоэлектронной аппаратуры / Д.А. Недорезов // Решетнёвские чтения. - 2011. N 15. - С. 626-627.

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

140. Ноженкова, Л.Ф. Программное обеспечение рабочего места конструктора бортовой аппаратуры командно-измерительной системы / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева // Сборник тезисов докладов всероссийской конференции с международным участием «Индустриальные информационные системы». - Новосибирск: КТИ ВТ СО РАН, 2015. - С. 49.

141. Ноженкова, Л.Ф. Проектирование предметно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева // Сибирский журнал науки и технологий. - 2017. - Т. 18, N 3. - С. 538-544.

142. Ноженкова, Л.Ф. Технология автоматизированной поддержки конструирования командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева // Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы информатизации региона». - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2015. - С.173-180.

143. 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.

144. Ноженкова, Л.Ф. Подготовка и проведение испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Р.В. Вогоровский // Исследования наукограда. - N 4(14). - 2015. - С. 60-67.

145. Ноженкова, Л.Ф. Автоматизация испытаний параметров и логики функционирования командно-измерительной системы / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Р.В. Вогоровский, Е.А. Грузенко // Исследования наукограда. - 2016. - N 3-4(18). - С. 17-24.

146. 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, Е.А. Грузенко // Вестник СибГАУ. - 2016. - Т. 17, N 4. - С. 997-1004.

147. Ноженкова, Л.Ф. Формирование процедур внешнего командно-программного управления для испытаний командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Р.В. Вогоровский, А.В. Мишуров // Исследования наукограда. - 2017. - N 4(22). - С. 175-183.

148. 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.

149. Ноженкова, Л.Ф. О создании программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко // Образовательные ресурсы и технологии. - 2014. - N 1(14). - С. 390-394.

150. 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.

151. Ноженкова, Л.Ф. Принципы построения и применения программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко // Материалы XIII Всероссийской конференции «Проблемы информатизации региона». - Красноярск: ИВМ СО РАН. - 2013. - С. 250-255.

152. Ноженкова, Л.Ф. Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко // Исследования наукограда. - 2015. - N 4(14). - С. 50-59.

153. Ноженкова, Л.Ф. Программно-математическая модель командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко // Решетневские чтения. - 2014. - Т. 2, N 18. - С. 267-269.

154. 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 СибГАУ. - 2014. - N 2(54). - С. 114-119.

155. Ноженкова, Л.Ф. Компоненты унификации модели бортовой аппаратуры космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко, А.И. Белорусов // Современные наукоемкие технологии. - 2016. - N 11-2. - С. 284-288.

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

157. 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.

158. Ноженкова, Л.Ф. Технология автоматизации рабочего места конструктора бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата

рата модели / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко и др. // Исследования наукограда. - 2015. - N 4(14). - С. 42-49.

159. Ноженкова, Л.Ф. Учебно-исследовательская система для поддержки деятельности конструктора бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, А.Ю. Колдырев // Исследования наукограда. - 2015. - N 4(14). - С. 68-73.

160. 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.

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

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

163. Ноженкова, Л.Ф. 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. / Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Р.В. Вогоровский и др. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. - 2017.

164. 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.

165. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 430 с.

166. Остроух, А.В. Интеллектуальные системы / А.В. Остроух. - Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. - 110 с.

167. Отчёт о НИОКР «Внедрение на рабочих местах конструкторов средств удалённой работы с ПО подготовки и анализа испытаний КИС КА» 3325 ИВМ-2-17. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2017. - 45 с.

168. Отчёт о НИОКР «Модернизация и внедрение подсистемы приёма-передачи команд в ПО для проведения автономных испытаний КИС КА» 3325 ИВМ-2-16. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2017. - 74 с.

169. Отчёт о НИОКТР «Аналитические исследования. Разработка концепции производства. Создание 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» 10290-1-13. - Красноярск: СФУ, 2013. - 968 с.

170. Отчёт о НИОКТР «Разработка конструкторской документации, программной документации, программного обеспечения. «Создание 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» 10290-3-14. - Красноярск: СФУ, 2014. - 278 с.

171. Отчёт о НИР «Разработка составной части НИОКТР – программно-математической (имитационной) модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы». 1 этап «Проектирование и разработка первой очереди ПММ БА КИС» 4430 ИВМ-1-13. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. - 379 с.

172. Отчёт о НИР «Разработка составной части НИОКТР – программно-математической (имитационной) модели бортовой аппаратуры командно-

измерительной системы». 2 этап – «Проектирование и разработка второй очереди ПММ БА КИС» 4430 ИВМ-2-14. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2014. - 316 с.

173. Отчёт о НИР «Разработка составной части НИОКТР – программно-математической (имитационной) модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы». 3 этап – «Разработка третьей очереди ПММ БА КИС» 4430 ИВМ-3-14. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2014. - 115 с.

174. Отчёт о НИР «Разработка составной части НИОКТР – программно-математической (имитационной) модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы». 4 этап – «Проведение испытаний и доработка ПО» 4430 ИВМ-4-15. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2015. - 74 с.

175. Павлов, С.Н. Системы искусственного интеллекта / С.Н. Павлов. - Томск: Эль Контент, 2011. - 176 с.

176. Пакман, Д.Н. Проблемы обработки телеметрической информации в контуре автоматизированной системы управления космическими аппаратами / Д.Н. Пакман, М.В. Некрасов, А.Н. Антамошкин // Вестник Сибирского Государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнёва. - 2009. - N 1(22). - С. 4-9.

177. Паронджанов, В.Д. Визуальный язык ДРАКОН и его применение в ракетно-космической отрасли, медицине и других областях / В.Д. Паронджанов // Материалы Международной научно-технической конференции «Системы и комплексы автоматического управления летательными аппаратами». - 2013. - С. 1-28.

178. Пенькова, Т.Г. Методика комплексной поддержки процессов подготовки, формирования и реализации решений в территориальном управлении: дис. канд. техн. наук. - Красноярск, 2009 - 180 с.

179. Перцовский, М.И. Программный комплекс АСTest – комплексный подход к автоматизации испытаний и экспериментальных исследований / М.И. Перцовский, А. В. Ртищев, А.С. Шулик и др. // RM MAGAZINE. - 2005. - N 5. - С. 50-55.

180. Перегудов, Ф.И. Основы системного анализа: учеб. 2-е изд., доп. / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. - Томск: Изд-во НТЛ, 1997. - 396 с.

181. Перспективы развития программного обеспечения космической деятельности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kosmos.claw.ru/kategorii/programmnoe-obespechenie>.

182. Петриченко, Г.С. Оценка эффективности программного обеспечения / Г.С. Петриченко, В.Г. Петриченко // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. - 2016. - N 9(230). - С. 108-112.

183. Петров, А.В. Моделирование систем: учебное пособие / А.В. Петров. - Иркутск: Изд-во Иркутского госуд. техн. ун-та, 2000. - 268 с.

184. Программа и методика приемо-сдаточных испытаний ПММ БА КИС 4430 ИВМ-ПД-51 01-И-3-15. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2015. - 28 с.

185. Программа и методика приемо-сдаточных испытаний ПО КПА КИС 4430 ИВМ-ПД-51 01-И-4-15. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2015. - 20 с.

186. Программа и методика стыковочных испытаний ПО КПА КИС с ПО организации заказчика 3325 ИВМ-ПМ-001-17. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2016. - 27 с.

187. Прохорова, И.А. Теория систем и системный анализ: учебное пособие / И.А. Прохорова. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. - 49 с.

188. Прудков, В.В. Программные средства автономной отработки подсистем блока управления перспективных космических аппаратов / В.В. Прудков // Вестник СибГАУ им. ак. Решетнёва. - 2010. - N 1. - С. 7-9.

189. Разработка командно-измерительной системы для перспективных КА на базе платформы «Экспресс-4000»: методические указания МУ-№2012/06. - Железногорск, 2012. - 50 с.

190. Раннев, Г.Г. Измерительные информационные системы / Г.Г. Раннев. - М. Издательский центр «Академия», 2010. - 336 с.

191. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. - 1408 с.

192. Ртищев, А.В. Комплекс «АСTest» для автоматизации экспериментальных установок / А.В. Ртищев // Мир компьютерной автоматизации. - 2001. - N 3. - С. 35-39.

193. Ртищев, А.В. Программный комплекс «АСTest» – комплексный подход к автоматизации испытаний и экспериментальных исследований / А.В. Ртищев // ПиКАД. - 2005. - N 1. - С. 32-38.

194. Рубичев, Н.А. Измерительные информационные системы / Н.А. Рубичев. - М.: Дрофа, 2010. - 334 с.

195. Рудометов, С.В. Визуально-интерактивная система имитационного моделирования технологических систем: автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук / С.В. Рудометов. - Новосибирск: Омега Принт, 2011. - 16 с.

196. Руководство оператора «Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» 4430 ИВМ-ПД-34-О-1-16. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2017. - 151 с.

197. Руководство оператора «Программное обеспечение подсистемы приема-передачи команд и анализа телеметрии» 4430 ИВМ-ПД-34-О-1-16. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2016. - 101 с.

198. Руководство оператора «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» 4430 ИВМ-ПД-34-О-3-14. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2016. - 291 с.

199. Рябушкин, С.А. 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. / С.А. Рябушкин, Л.Ф. Ноженкова, В.В. Сухотин, О.С. Исаева и др. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. - 2015.

200. Рябушкин, С.А. 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. / С.А. Рябушкин, Л.Ф. Ноженкова, В.В. Сухотин,

О.С. Исаева и др. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. - 2014.

201. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. / Т. Саати. - М.: Радио и связь, 1993. - 278 с.

202. Сабитова, А.С. Система сбора, хранения и анализа информации, полученной при тестировании контрольно-проверочной аппаратуры космических аппаратов / А.С. Сабитова // Вестник науки Сибири. - 2012. - N 3(4). - С. 168-172.

203. Сафронов, С.Л. Разработка методики проектирования универсальных платформ малых космических аппаратов научного назначения: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук / С.Л. Сафронов. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм ун-та, 2012. - 16 с.

204. Семенова, В.А. Алгоритмизация формирования и прагматической трансформации ограничений существования свойств предметной области / В.А. Семенова, С.В. Смирнов // Онтология проектирования. - 2020. - Т. 10, №3(37). - С.361-379.

205. Советов Б.Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 2009. – 343 с.

206. Советов, Б.Я. Информационные технологии: теоретические основы / Б.Я. Советов, В.В. Цехановский. - СПб.: Издательство «Лань», 2017. - 448 с.

207. Спецификация программного обеспечения ПММ БА КИС 4430 ИВМ-СП-2-15. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2015. - 8 с.

208. Спицнадель, В.Н. Основы системного анализа / В.Н. Спицнадель. - СПб.: Изд-ский дом Бизнес-пресса, 2000. - 325 с.

209. Спицын, В.Г. Представление знаний в информационных системах: учебное пособие / В.Г. Спицын, Ю.Р. Цой. - Томск: Изд-во ТПУ, 2006. - 146 с.

210. Срульдинов, А.Р. Построение модели предоставления технической поддержки пользователей на языке моделирования AnyLogic / А.Р. Срульдинов, С.А. Варламова // Журнал «Juvenis scientia». - 2016. - N 3. - С. 11-14.

211. Стратилатов, Н.Р. Методические основы разработки проблемно-ориентированной системы выбора основных проектных параметров космических

аппаратов / Н.Р. Стратилатов, В.И. Куренков, А.С. Кучеров и др. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. - 2016. - Т. 15, N 2. - С. 68-79.

212. Тарасов, В.Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте / В.Б. Тарасов // Новости искусственного интеллекта. - 1998. - N 2. - С. 5-63.

213. Новосельцев, В.И. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин. - М.: Майор, 2006. - 592 с.

214. Технический проект. Пояснительная записка. Контрольно-проверочная аппаратура командно-измерительной системы 10290 ПЗ РЭС-040-13. - Красноярск: СФУ, 2013. - 60 с.

215. Техническое задание на выполнение 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». - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2016. - 14 с.

216. Техническое задание на выполнение НИОКТР «Создание 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» ТЗ 220-2746-13. - Красноярск: СФУ, 2013. - 48 с.

217. Техническое задание на выполнение НИР «Разработка составной части НИОКТР – программно-математической (имитационной) модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы» 10290 ТЗ РЭС-004-13. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. - 18 с.

218. Техническое задание на составную часть НИОКТР «Проектирование программного обеспечения для контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы и рабочего места конструктора бортовой аппаратуры ко-

мандно-измерительной системы» 10290 ТЗ РЭС-002-13. - Красноярск: СФУ, 2013. - 20 с.

219. Томашевский, В. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Томашевский, Е. Жданова. - М.: Бестселлер, 2003. - 416 с.

220. Точилов, Л.С. Проект базы знаний для разработчиков ракетно-космической техники / Л.С. Точилов // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2016. - В. 8.

221. Трофимов, С.А. CASE-технологии. Практическая работа в Rational Rose / С.А. Трофимов. - М.: Бином-Пресс, 2002. - 288 с.

222. Туркин И. Компонентная модель программного обеспечения для испытаний бортовых систем космического аппарата / И. Туркин, П. Лучшев, И. Перекопский и др. // СТА. - 2006. N 1. С. 66-73.

223. Тюгашев, А.А. Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств / А.А. Тюгашев // Надежность и качество сложных систем. - 2016. - N 2(14). - С. 9-16.

224. Углев, В.А. Обеспечение перспективными платформами высокотехнологичных лабораторных комплексов при подготовке специалистов в сфере автоматизации / В.А. Углев, О.В. Адмаев // Материалы XVI Всероссийской конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта России». - Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС. - 2012. - С. 27-30.

225. Уотермен, Д. Руководство по экспертным системам: пер. с англ. / Д. Уотермен. - М.: Мир, 1989. - 441 с.

226. Федун, Б.Е. Бортовые оперативно-советующие экспертные системы – новый класс алгоритмов управления / Б.Е. Федун // XIV International Conference «Knowledge-Dialogue-Solution». - 2008. - С. 123-132.

227. Федун, Б.Е. Вывод по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем / Б.Е. Федун, М.Д. Прохоров // Искусственный интеллект и принятие решений. - 2010. - N 3. - С. 63-72.

228. Феоктистов, А.Г. Инструментальные средства имитационного моделирования предметно-ориентированных распределенных вычислительных систем / А.Г. Феоктистов, А.С. Корсуков, Ю.А. Дядькин // Системы управления, связи и безопасности. - 2016. - N 4. - С. 30-60.

229. Фраленко, В.П. Методы и алгоритмы обработки потоков данных в многопроцессорных вычислительных комплексах командно-измерительных систем на основе моделей нейронных сетей: автореф. дис. канд. техн. наук / В.П. Фраленко. - Переславль-Залесский. - 2011. - 21 с.

230. Фураева, Ю.А. Система сетевого моделирования с интерфейсом на естественном языке / Ю.А. Фураева, О.Ю. Сабинин [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://inftech.webservis.ru/it/conference/scm/1999/session2/furaeva.html>

231. Хомоненко, А.Д. Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли / А.Д. Хомоненко, Д.Ю. Старобинец, В.А. Лохвицкий // Труды СПИИРАН. - 2016. - В. 3(46). - С. 49-64.

232. Хомяков, П.М. Системный анализ / П.М. Хомяков. - М.: Изд-во ЛКИ, 2008. - 216 с.

233. Хорошев, А.Н. Управление решением проектных задач на предприятии / А.Н. Хорошев // Современные научные исследования и инновации. - М.: Международный научно-инновационный центр. - 2011. - N 7(7). - С. 3-4.

234. Хохлачев, Е.Н. Обоснование требований к закупаемым служебным системам и устройствам при создании и модернизации космических аппаратов / Е.Н. Хохлачев, А.Е. Шаханов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. - 2016. - N 4(34). - С. 90-95.

235. Хрусталёв, Е.Ю. Основы экономического анализа космической деятельности России / Е.Ю. Хрусталёв, Ю.Н. Макаров // Экономический анализ: теория и практика. - М: «Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ», 2011. - N 29(236). - С. 41-47.

236. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы. Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование / М.П. Цапенко. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 438 с.

237. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Экспертно-аналитический доклад. - М.: «Технет» НТИ, 2019. - 58 с.

238. Черемных, С.В. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум / С.В. Черемных, И.О Семенов., В.С. Ручкин. - М.: Финансы и статистика, 2006. - 192 с.

239. Черток, Б.Е. Эволюция вычислительных систем с элементами ИИ, применяемых в системах управления космическими аппаратами / Б.Е. Черток, В.Н. Бранец, Е.А. Микрин, А.С. Кнутов // Искусственный интеллект. - 2012. - N 4. - С. 23-27.

240. Чуранов, С.А. Автоматизированные системы диагностики «Тест-Д» / С.А. Чуранов // «Индустрия». - 2011. - N 1. - С. 17.

241. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад / А.И. Боровков, А.А. Гамзикова, К.В. Кукушкин, Ю.А. Рябов. СПб.: Политех-пресс, 2019. 62 с.

242. «Цифровой двойник» космической ракеты [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dx.media/articles/case/tsifrovoy-dvoynik-kosmicheskoy-rakety>.

243. Эйкхофф, Й. Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полётные операции / Й. Эйкхофф. - М.: Техносфера, 2014. - 344 с.

244. Экспертные системы. Принципы работы и примеры: Пер. с англ./ А. Брукинг, П. Джонс, Ф. Кокс и др.; Под ред. Р.Форсайта. - М.: Радио и связь, 1987. - 224 с.

245. Юрков, Н.К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы: моногр. / Н.К. Юрков. - Пенза: Изд-во ПГУ. - 2010. - 304 с.

246. AnyLogic 7.2 Released – AnyLogic Simulation Software [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.anylogic.com.

247. Arguello, L. SMP: A Step Towards Model Reuse in Simulation / L. Arguello, J. Miró, J. Gujer, K. Nergaard // ESA Bulletin. - 2000. - N 103. - P. 107-111.

248. Barjis, J. An Example of Business Process Simulation Using ARENA / J. Barjis // Proceedings of the 3rd International Workshop on Modelling, Simulation, Verification and Validation of Enterprise Information Systems. - 2005. - P. 107-112.

249. Bonet, B. Planning as heuristic search / B. Bonet, H. Geffner // Artificial Intelligence. - 2001. - Vol. 129. - P. 5-33.

250. Bostock, M. Data-Driven Documents / M. Bostock [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://d3js.org/>.

251. Bress, T. Effective LabVIEW Programming / T. Bress. - New York: NTC Press, 2013. - 720 p.

252. Brouwer M., Developments in test and verification equipment for spacecraft / M. Brouwer, A. Casteleijn, I. Schenau, B. Oving, L. Timmermans, T. Zwartbol. 2000. - Noordwijk: National Aerospace Laboratory. - 20 p.

253. Cazenave, C. Implementing SMP2 standard within SimTG simulation infrastructure / C. Cazenave, W. Arrouy // Proceedings of Simulation and EGSE for space programmes. - 2012. - P. 1-13.

254. Cetinkaya, D. A metamodel for the HLA object model / D. Cetinkaya, H. Oğuztüzün // Proceedings 20th European Conference on Modelling and Simulation. - 2006. - P. 1-7.

255. Koo, C-H. Development of simulation infrastructure compatible with ESA SMP for validation of flight software and verification of mission operation / C-H. Koo, H.-H. Lee, S.-T. Moon et al. // Proceedings of Simulation and EGSE for Space Programmers. - 2012. - P. 1-8.

256. Chung, C. Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach / C. Chung. - CRC Press, 2004. - 608 p.

257. Cohen, L. SMP2 Modelling using the K2 Simulation infrastructure / L. Cohen, A. Mollier, S. Vinay // Workshop on Simulation for European Space Programmers. - 2015. - P. 8.

258. Diamond, B. ExtendSim Advanced Technology: Integrated Simulation Database / B. Diamond, D. Krahle, A. Nastasi et al. // Proceedings of the winter simulation conference. - 2010. - P. 32-39.

259. Dinesh, S. Qualnet Simulator / S. Dinesh, G. Sonal // International Journal of Information & Computation Technology. - 2014. - Vol. 4, N 13. - P. 1349-1354.
260. Durfee, W.K. Interactive Software for Dynamic System Modeling Using Linear Graphs / W.K. Durfee, M.B. Wall, D. Rowell et al. // IEEE Control Systems. - 1991. - Vol. 11. - P. 60-66.
261. Edelkamp, S. Planning with pattern databases / S. Edelkamp // Lect. Notes Comput. Sci. - 2001. - P. 13-34.
262. Eggleston, J. Simsat 3.0: Esoc's New Simulation Infrastructure / J. Eggleston, H. Boyer, D. Zee // 6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations. - 2005. - P. 2-29.
263. Eickhoff, J. Simulating Spacecraft System / J. Eickhoff. - Springer, 2009. - 376 p.
264. Eito-Brun, R. Design of an Ontologies for the Exchange of Software Engineering data in the Aerospace Industry / R. Eito-Brun // Communications in Computer and Information Science. - 2016. - N 649. - P. 71-78.
265. Fritzen, P. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC / P. Fritzen, D. Segneri, M. Pignede // Proceedings of the 11th International Workshop on Simulation & EGSE facilities for Space Programmers. - 2010. - P. 7.
266. Garavel, H. OPEN/CÆSAR: An open software architecture for verification, simulation, and testing / H. Garavel // Proceedings of the First International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of System. - 1998. - P. 2-18.
267. Garrison, W.J. A brief SIMSCRIPT II5 tutorial / W.J. Garrison // Proceedings of the Winter Simulation Conference. - 1990. - P. 115-117.
268. Gavrilova, T. Practical design of business enterprise ontologies / T. Gavrilova, D. Laird // Industrial Applications of Semantic Web (Eds. Bramer M. and Terzyan V.). - Springer. - 2005. - P.61-81.
269. Glaessgen, E.H. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles / E.H. Glaessgen, D.S. Stargel // 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin. - 2012. - P. 1-14.

270. Grieves, M. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems / M. Grieves, J. Vickers [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept.

271. Guimaraes, D.A. Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm / D.A. Guimaraes. - Berlin: Springer, 2010. - 863 p.

272. Guo, J. Incorporating multidisciplinary design optimization into spacecraft systems engineering / J. Guo // 8th Conference on Systems Engineering Research: Hoboken, NJ, March 17-19 2010. - P. 314-323.

273. Hawryszkiewicz, I.T. A meta model for modeling collaborative systems / I.T. Hawryszkiewicz // J. Comput. Inf. Syst. - 2016. - Vol. 45(3). - P. 19-43.

274. Hennig, C. Ontology-based design of space systems / C. Hennig, A. Viehl, B. Kampgen et al. // Lecture Notes in Computer Science. - 2016. - V. 9982. - P. 308-324.

275. Hernandez, J.A. Intelligent decision support for assembly system design / J.A. Hernandez, T.J. Peters // The third conference on innovative applications of artificial intelligence. - California: The AAAI Press. - 1991. - P. 135-156.

276. Hoffmann, L.T. The role of computational steering in space engineering activities assisted by modelling and simulation / L.T. Hoffmann. - São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2014. - 239 p.

277. Holte, R.C. Multiple pattern databases / R.C. Holte, J. Newton, A. Felner et al. // Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling. - 2004. - P. 122-131.

278. Information Technology - Open Systems Interconnection - Conformance testing methodology and framework. ISO/IEC 9646-1. Part 1: General concepts, 1994. - 46 p.

279. Introduction to Military Training Simulation: A Guide for Discrete Event Simulationists [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.modelbenders.com/papers/mil4des.html>.

280. Isaeva, O.S. Technology of spacecraft on-board equipment design support / O.S. Isaeva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1047. - pp. 012115. doi: 10.1088/1757-899X/1047/1/012115.

281. Isaeva, O.S. Graphical method of intellectual simulation models' analysis on the basis of technical systems' testing results / O.S. Isaeva, L.F. Nozhenkova, N.V. Kulyasov, S.V. Isaev // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2020. - Vol. 1295. - P. 368-376. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6_33.

282. Isaeva, O.S. Method of structural and graphical analysis and verification of intellectual simulation model / O.S. Isaeva, N.V. Kulyasov, S.V. Isaev // Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta-upravlenie vychislitel'naja tehnika i informatika-Tomsk state university journal of control and computer science). DOI: 10.17223/19988605/50/10.

283. 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. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934340.

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

285. 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. doi:10.1088/1742-6596/1353/1/012011.

286. Isaeva, O.S. Spacecraft onboard equipment testing automation technology on the basis of simulation model / O.S. Isaeva, L.F. Nozhenkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. P. 1-6. doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032067.

287. Isaeva, O.S. Methods of test procedures' generation on the basis of simulation model's knowledge base / O.S. Isaeva, L.F. Nozhenkova, A.Yu. Koldyrev // Advances

in Intelligent Systems Research. - 2018. - Vol. 164. - P. 32-35. . doi: 10.2991/mmssa-18.2019.8.

288. ITU-T Recommendation Z.140 - Testing and Test Control Notation. - Geneva: International Telecommunications Union, 2003. - 190 p.

289. Krah, D. Reliability Modeling with ExtendSim / D. Krah, A. Nastasi // Proceedings of the Winter Simulation Conference. - 2014. - P. 4219-4225.

290. Krausz, A. Effectiveness of Spacecraft Testing Programs / A. Krausz // Proc. 11th Space Simulation Conference. - Washington: NASA. - 1980. - P. 13.

291. Kulyasov, N.V. Method of creation and verification of the spacecraft onboard equipment operation model / N.V. Kulyasov, O.S. Isaeva, S.V. Isaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - P. 1-6. doi: 10.1088/1757-899X/537/2/022042.

292. LabVIEW function and VI reference manual. - Texas: National Instruments Corporation, 2003. - 349 p.

293. Lammen, W.F. Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic model transfer / W.F. Lammen, D. Jaffry, J.M. Moelands et al. // Noordwijk: Netherlands Aerospace Centre, 2016. - 20 p.

294. Lammen, W.F. MOSAIC 11.0: User Manual, NLR-CR 2015-524 / W.F. Lammen. - Amsterdam: Netherlands Aerospace Centre, 2016. - 22 p.

295. Lau, V. A Multidisciplinary Design Optimization Tool for Spacecraft Equipment Layout Conception / V. Lau, R.L. Galski et al. // J. Aerosp. Technol. Manag. - 2014. - Vol. 6, N 4. - P.431-446.

296. Liu, Y. An overview of simulation-oriented model reuse. Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems / Y. Liu, L. Zhang, W. Zhang et al. - Springer. - 2016. - Vol. 646. - P. 48-56.

297. Luger, G.F. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving (6th Edition) / G.F. Luger. - Boston: Pearson Education, 2009. - 754 p.

298. Mattsson, E. Otter Physical System Modeling with Modelica / E. Mattsson // Control Engineering Practice. - 1998. N 6. - P. 501-510.

299. Miller, S. Introduction to manufacturing simulation / S. Miller, D. Pegden // Proceedings of the Winter Simulation Conference. - 2000. - P. 63-66.

300. Min, F. Knowledge-based method for the validation of complex simulation models / F. Min, M. Yang, Z. Wang // Simulation Modelling Practice and Theory. - 2010. - N 18(5). - P. 500-515.

301. Nozhenkova, L.F. Tools of computer modeling of the space systems' onboard equipment functioning / L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, A.A. Evsyukov // SPIIRAS Proceedings. - 2018. -Vol. 1, Iss. 56. - P. 144-168. DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.56.7>.

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

303. 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. DOI: 10.2991/amsee-16.2016.57.

304. 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. DOI: 10.12783/dtetr/tmcm2017/12614.

305. 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. DOI: 10.2991/ammsa-17.2017.27.

306. 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. DOI: 10.2991/cisia-15.2015.255.

307. Nozhenkova, L.F. Problem-oriented integration of SMP-models in the simulation modeling infrastructure / L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, E.A. Gruzenko et al. //

Advances in Intelligent Systems Research. - 2017. - Vol. 141. - P. 121-124. DOI:10.2991/ammsa-17.2017.26.

308. Nozhenkova, L.F. Creation of the base of a simulation model's precedents for analysis of the spacecraft onboard equipment testing results / L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, A.Yu. Koldyrev // Advances in Intelligent Systems Research. - 2018. - Vol. 151. - P. 78-81. doi: 10.2991/cmsa-18.2018.18.

309. 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. DOI: 10.2991/caai-17.2017.28.

310. Nozhenkova, L.F. Command and Software Management Simulation for the Spacecraft Equipment Testing / L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, R.V. Vogorovskiy // 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. - 2018. - P. 1-4. doi: 10.1109/RPC.2018.8482182.

311. 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. doi: 10.2991/aiie-16.2016.111.

312. Nozhenkova, L.F. Scenario approach to testing spacecraft's onboard equipment command and software management / L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, R.V. Vogorovskiy // DEStech Transactions on Engineering and technology research. - 2017. - P. 53-57. DOI: 10.12783/dtetr/tmcm2017/12614.

313. Nozhenkova, L.F. Software tools for modeling space systems' equipment command-and-software control / L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, A. Evsyukov // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. - 2017. - P. 87-92. DOI: 10.12783/dtcse/cece2017/ 14379.

314. Nozhenkova, L. F. Organization of complex testing of the spacecraft command and measuring system / L.F. Nozhenkova, O.S. Isaeva, A.Yu. Koldyrev // Siberian Journal of Science and Technology. - 2018. - Vol. 19, N 3. - P. 510-516. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-510-516.

315. Object Management Group – UML [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://uml.org/>.
316. Packet Telemetry Standard ESA PSS-04-105. - European space agency (ESA), 1988. Iss. 1. - 73 p.
317. Parrott, A. Industry 4.0 and the digital twin manufacturing meets its match / A. Parrott, L. Warshaw. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
318. Pereira, T.D. Using the PLUTO language on functional tests of a Brazilian Satellite's on-board data handling computer / T.D. Pereira, M.G. Ferreira, F.N. Kucinskis // Brazilian National Institute for Space Research Jornal. - 2012.
319. Pignède, M. Swarm Constellation Simulator / M. Pignède, J. Morales, P. Fritzen et al. // Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA. - 2010. - P. 2323.
320. Pisacane, V.L. Space Systems Engineering. In: Macdonald M., Badescu V. (eds) The International Handbook of Space Technology. Springer Praxis Books / V.L. Pisacane - Springer, Berlin, Heidelberg. - 2014. - P. 143-163.
321. Report on ERP systems and enterprise software [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://panorama-consulting.com/resource-center/2016-erp-report/>.
322. Rabelo, L. Simulation modeling of space missions using the high level architecture / L. Rabelo et al. // Modelling and Simulation in Engineering. - 2013. - P. 1-12
323. Russel, S. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd Edition. / S. Russel, P. Norvig - Prentice Hall, 2010. - 1152 p.
324. Russell, S. Artificial intelligence: a modern approach. / S. Russel. -New Jersey: A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, 1995. - 932 p.
325. Saaty, T. The Analytic Network Process – Decision Making with Dependence and Feedback / T. Saaty. - Pittsburgh: RWS Publications, 1996. - 370 p.
326. Saracoglu, B.O. Identification of technology performance criteria for CAD/CAM/CAE/CIM/CAL in shipbuilding industry / B.O. Saracoglu, S. Gozlu // Conference «Technology Management for the Global Future». - Istanbul: IEEE. - 2006. - P. 1635-1646.

327. Sarkarati, M., Cloud based architectures in ground systems of space missions / M. Sarkarati, M. Merri, M. Spada // Proceedings of GSW. - 2013. - P. 1-14.
328. Schamai, W. Translation of UML State Machines to Modelica: Handling Semantic Issues / W. Schamai, P. Fritzson, C. Paredis // SIMULATION. - 2013. - P. 498-512.
329. Schmidt, A. Model-based testing methodology using system entity structures for MATLAB/Simulink models / A. Schmidt, U. Durak, T. Pawletta // SIMULATION. N 92(8). -2016. - P. 729-746.
330. Shah, V.A. Analysis perspective views of grid simulation tools / V.A. Shah // Journal of Grid Computing. - 2015. - Vol. 13, N 2. - P. 177-213.
331. Simulation modelling platform. ECSS E-40-07. - Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2011. 869 p.
332. Simulation modelling platform. Metamodel. ECSS E-40-07. – Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2011. 169 p.
333. Sinha, R. Modeling and simulation methods for design of engineering systems / R. Sinha, C. Paredis, P.K. Khosla // Comput. Inf. Sci. Eng, № 1(1), 2000. P. 84-91.
334. Sódor, B. The conceptual architecture of a generalized dsml based simulation framework for onboard system / B. Sódor, G. Tróznai, S. Szalai // 63rd International Astronautical Congress. - 2012. - P. 1-6.
335. Space project management. Project planning and implementation. ECSS-M-ST-10C. - Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2009. - 50 p.
336. System engineering general requirements. ECSS-E-ST-10-03C. – Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2012. - 100 p.
337. System modelling and simulation. ECSS-E-TM-10-21A. - Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division. 2009. - 111 p.
338. Standard for Common Image Generator Interface (CIGI). Ver. 4.0. - Orlando: SISO Inc, 2014. - 326 p.
339. Standard for Distributed Interactive Simulation. Application Protocols. - IEEE, 2012. - 747 p.
340. Stanley, G.M. Experiences using knowledge-based reasoning in online control systems / G.M. Stanley // Symposium on computer aided design in control systems. - 1991. - P. 11-19.

341. Strauss, J.C. The SCI Continuous System Simulation Language (CSSL) / J.C. Strauss // Simulation. - 1967. -N 9. - P. 281-303.
342. Strzepek, A. A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission / A. Strzepek, F. Esteve, S. Salas et al. // Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations (SpaceOps 2016). NY: American Institute of Aeronautics and Astronautics. - 2016. - P. 1736-1746.
343. System and software engineering – Software life cycle processes. ISO/IEC 12207:2008, 2008. - 123 p.
344. System Design, modeling, and simulation using Ptolemy II: Ptolemy.org, 2014. - 674 p.
345. Swartwout, M. Spacecraft integration and test: an undergraduate course in systems engineering practice / M. Swartwout, S. Jayaram. - NY: American Society for Engineering Education, 2012. - 10 p.
346. Szalai, S. An Overview of Low-Cost EGSE Architectures Improvement / S. Szalai, J. Nagy, I. Horváth et al. // Acta Polytechnica Hungarica. - 2016. - V. 13, N 3. - P. 139-158.
347. Tabakov, E.V., Debugging method for spacecraft's equipment based on ARM processors / E.V. Tabakov, A.I. Zinina, D.S. Kireev // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2020. -N 862. - P. 052060.
348. Tan, C.F. The application of expert system: a review of research and applications / C.F. Tan, L.S. Wahidin, S.N. Khalil et al. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2016. - V. 11, N 4. - P. 2448-2453.
349. Telecommand decoder specification ESA PSS-04-151. Iss. 1. - European space agency (ESA), 1992. - 114 p.
350. Testing. ECSS-E-ST-10-03A. - Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2002. - 160 p.
351. Torralba, Á. Symbolic perimeter abstraction heuristics for cost-optimal planning / Á. Torralba, C.L. López, D. Borrajo // Artificial Intelligence. - 2018. - Vol. 259. - p. 1-31.
352. Tretmans, J. Automatic testing with formal methods / J. Tretmans, A. Belinfante // CTIT Technical Report Series. - 1999. - N 99-17. - P. 21.

353. Telemans, J. Testing Concurrent Systems: A Formal Approach / J. Telemans. - Berlin: Springer. - 1999. - P. 46-65.
354. Vasile, M. Fast evidence-based space system engineering / M. Vasile, E. Minisci // 62nd International Astronautical Congress: South Africa. - 2011. - P. 1-12.
355. Verification. ECSS-E-ST-10-02C. - Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2009. - 45 p.
356. Watson, M.D. Engineering elegant systems: theory of systems engineering / M.D. Watson. - Washington: NASA Marshall Space Flight Center, 2017. - 199 p.
357. Zhou, Y. An intelligent model validation method based on ECOC SVM / Y. Zhou et al. // Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation. - 2018. - P. 67-71.
358. Zanon, O. The SimTG simulation modeling framework a domain specific language for space simulation / O. Zanon // Proceedings of the 2011 Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium. - 2011. - P. 16-23.
359. Zeigler, B.P. Service-oriented model engineering and simulation for system of systems engineering. Concepts and Methodologies for Modeling and Simulation / B.P. Zeigler, L. Zhang. - Berlin: Springer International Publishing. - 2015. - P. 19–44.
360. Zhang, G. The system entity structure: knowledge representation for simulation modeling and design / G. Zhang, B.P Zeigler // Artificial Intelligence, Simulation and Modeling. - New York: Wiley. - 1989. - P. 47-73.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Копии свидетельств о государственной регистрации
программ для ЭВМ**

**1. Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры
командно-измерительной системы космического аппарата**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014662250

**Программное обеспечение контрольно-проверочной
аппаратуры командно-измерительной системы
космического аппарата (ПО КПА КИС)**

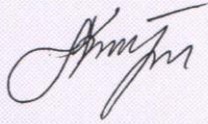
Правообладатель: *Открытое акционерное общество
«Информационные спутниковые системы» имени академика
М.Ф. Решетнёва» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № **2014660214**
Дата поступления **09 октября 2014 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **26 ноября 2014 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



 Л.Л. Курий

**Вторая сторона свидетельства о государственной регистрации
программы для ЭВМ «Программное обеспечение контрольно-проверочной
аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата»**

Авторы: *Рябушкин Станислав Анатольевич (RU), Ноженкова Людмила Федоровна (RU), Сухотин Виталий Владимирович (RU), Исаева Ольга Сергеевна (RU), Грузенко Евгений Андреевич (RU), Вогоровский Родион Вячеславович (RU), Мишуков Андрей Валериевич (RU), Марков Алексей Александрович (RU), Камышников Алексей Николаевич (RU), Евсюков Александр Анатольевич (RU), Колдырев Андрей Юрьевич (RU), Горчаковский Александр Антонович (RU), Евстратько Владислав Владимирович (RU), Петренко Вадим Леонидович (RU), Шатров Виталий Альбертович (RU)*

**2. Программно-математическая модель бортовой аппаратуры
командно-измерительной системы космического аппарата**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015661981

**Программно-математическая модель бортовой аппаратуры
командно-измерительной системы космического аппарата
(ПММ БА КИС)**

Правообладатель: *Акционерное общество «Информационные
спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № **2015619028**

Дата поступления **30 сентября 2015 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **13 ноября 2015 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



**Вторая сторона свидетельства о государственной регистрации
программы для ЭВМ «Программно-математическая модель бортовой аппа-
ратуры командно-измерительной системы космического аппарата»**

Авторы: *Рябушкин Станислав Анатольевич (RU), Ноженкова Людмила Федоровна (RU), Сухотин Виталий Владимирович (RU), Исаева Ольга Сергеевна (RU), Грузенко Евгений Андреевич (RU), Возоровский Родион Вячеславович (RU), Колдырев Андрей Юрьевич (RU), Евсюков Александр Анатольевич (RU), Белолипецкий Павел Викторович (RU), Мишуков Андрей Валериевич (RU), Камышников Алексей Николаевич (RU), Горчаковский Александр Антонович (RU), Евстратько Владислав Владимирович (RU), Петренко Вадим Леонидович (RU), Шатров Виталий Альбертович (RU), Вильданов Айдар Ильгизович (RU)*

**3. Инструментальная среда имитационного моделирования
программно-технических комплексов**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014617786

**«Инструментальная среда имитационного моделирования
программно-технических комплексов»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт вычислительного моделирования
Сибирского отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Ноженкова Людмила Федоровна (RU), Исаева Ольга
Сергеевна (RU), Грузенко Евгений Андреевич (RU), Вогоровский
Родион Вячеславович (RU), Колдырев Андрей Юрьевич (RU)*

Заявка № **2014615355**

Дата поступления **03 июня 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **04 августа 2014 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



4. Инструменты графического моделирования программно-технических комплексов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014617411

**«Инструменты графического моделирования
программно-технических комплексов»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Ноженкова Людмила Федоровна (RU), Исаева Ольга Сергеевна (RU), Грузенко Евгений Андреевич (RU), Вогоровский Родион Вячеславович (RU)*

Заявка № **2014615159**

Дата поступления **29 мая 2014 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **21 июля 2014 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Б.П. Симонов**



5. Редактор формирования процедур внешнего командно-программного управления для испытаний командно-измерительной системы космического аппарата

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017662761

Редактор формирования процедур внешнего командно-программного управления для испытаний командно-измерительной системы космического аппарата

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Ноженкова Людмила Федоровна (RU), Исаева Ольга Сергеевна (RU), Вогоровский Родион Вячеславович (RU), Мишуков Андрей Валериевич (RU)*



Заявка № **2017619657**

Дата поступления **26 сентября 2017 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 ноября 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

6. Программное ядро инфраструктуры имитационного моделирования

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018610037

**Программное ядро инфраструктуры имитационного
моделирования**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской
академии наук» (RU)**

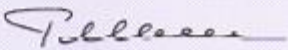
Авторы: **Ноженкова Людмила Федоровна (RU), Исаева Ольга Сергеевна
(RU), Марков Алексей Александрович (RU), Вогоровский Родион
Вячеславович (RU), Колдырев Андрей Юрьевич (RU), Евсюков
Александр Анатольевич (RU)**

Заявка № **2017661290**

Дата поступления **07 ноября 2017 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Излиев**



7. Инструменты испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата на основе имитационной модели

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020616059

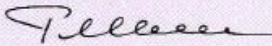
**Инструменты испытаний бортовой аппаратуры
космического аппарата на основе имитационной модели**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (RU)**

Авторы: **Исаева Ольга Сергеевна (RU), Ноженкова Людмила Фёдоровна (RU), Колдырев Андрей Юрьевич (RU)**

Заявка № **2020614901**
Дата поступления **15 мая 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **08 июня 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Изrael**



8. Интерактивные инфографические инструменты анализа модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020616060

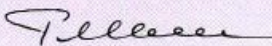
**Интерактивные инфографические инструменты анализа
модели функционирования бортовой аппаратуры
космического аппарата**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (RU)*

Авторы: *Исаева Ольга Сергеевна (RU), Ноженкова Людмила Фёдоровна (RU), Кулясов Никита Владимирович (RU), Исаев Сергей Владиславович (RU)*

Заявка № **2020614900**
Дата поступления **15 мая 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **08 июня 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Излиев**



ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Копии документов о внедрении результатов диссертационной работы и программного обеспечения

1. Акт об использовании результатов диссертации в АО «ИСС»

Акционерное общество
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени академика М.Ф. Решетнёва

ул. Ленина, д. 52, г. Железнодорожск, ЗАТО Железнодорожск, Красноярский край, Российская федерация, 662972

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора
по электрическому проектированию
и системам управления КА

С.Г. Кочура
«14» 12 2020 г.



Акт № 220-04/12

Об использовании результатов диссертационного исследования Исаевой Ольги Сергеевны

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования Исаевой О.С. «Технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов» используются в деятельности АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва. Предложенная автором технология интеллектуального имитационного моделирования, разработанные методы автоматизации испытаний бортовой аппаратуры, а также проблемно-ориентированные системы ПММ БА КИС и ПО КПА КИС применены при создании опытного участка для производства командно-измерительных систем космических аппаратов в стандартах международного консультационного комитета по космическим системам данных (CCSDS) для использования на негерметичных космических аппаратах.

Внедрение результатов диссертационного исследования Исаевой О.С. позволило обеспечить процессы производства командно-измерительных систем, повысить эффективность подготовки и проведения испытаний за счет использования предложенных в диссертационной работе подходов, методов и инструментов, обеспечивающих надежность, оперативность и снижение трудоемкости информационных процессов, возникающих при проектировании, разработке и испытаниях бортовых систем космических аппаратов.

Начальник отдела 220

 / С.А. Рябушкин
Подпись

Начальник сектора 2204

 / А.И. Вильданов
Подпись

2. Акт об использовании результатов диссертации в СФУ



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

SIBIRIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

660041, Красноярский край,
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-86-25
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;
ИНН/КПП 2463011853/246301001



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Денис Сергеевич Гуц

« 16 » 02 2021 г.

№ _____
на № _____ от _____

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы «Технология
интеллектуального имитационного моделирования и анализа
функционирования бортовых систем космических аппаратов» Исаевой Ольги
Сергеевны в учебном процессе
Сибирского федерального университета

Комиссия в составе:

Председатель – Гарин Евгений Николаевич, директор Военно-инженерного института, д.т.н., профессор

Члены комиссии:

- Сушкин Игорь Николаевич, заведующий базовой кафедрой «Специальные радиотехнические системы» Военно-инженерного института, канд. техн. наук, доцент;
- Панько Сергей Петрович, профессор базовой кафедры «Специальные радиотехнические системы» Военно-инженерного института, д.т.н., профессор;

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Исаевой О.С. использованы в учебном процессе базовой кафедры «Специальные радиотехнические системы» Военно-инженерного института Сибирского федерального университета для подготовки студентов-курсантов по специальностям:

- 11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы;
- 11.05.02 - Специальные радиотехнические системы;

В рамках теоретического обучения по дисциплинам: «Радиотехнические системы специального назначения», «Основы теории радиосистем и комплексов управления» и «Основы теории радиосистем передачи информации» используются авторские учебные материалы Исаевой О.С., полученные при выполнении диссертационного исследования.

Внедрение результатов диссертационного исследования Исаевой О.С. для подготовки высококвалифицированных специалистов для предприятий космической отрасли, обладающих знаниями по работе бортовой аппаратуры космических аппаратов, в долгосрочной перспективе будет способствовать решению сложных научно-технических задач по созданию инновационных изделий и обеспечению эффективности производства предприятий космической отрасли.

Председатель:

 Е.Н. Гарин

Члены комиссии:

 И.Н. Сушкин

 С.П. Панько

3. Акт о внедрении программного обеспечения в АО «ИСС»

Акционерное общество
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени академика М.Ф. Решетнёва»

ул. Ленина, д. 52, г. Железнодорожск, ЗАТО Железнодорожск, Красноярский край, Российская федерация, 662972

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора
по электрическому проектированию
и системам управления КА



С.Г. Кочура

Акт № 220-04/3 о внедрении (использовании) результатов интеллектуальной деятельности

Комиссия в составе:

председатель:

Главный конструктор электрического
проектирования и испытаний КА –
начальник отделения

С.И. Опенько

члены комиссии:

Начальник отдела 220

С.А. Рябушкин

Начальник сектора 2204

А.И. Вильданов

составили настоящий акт о внедрении программного комплекса в составе:

1. 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.;

2. 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.

Программный комплекс представляет собой программно-технологическую платформу интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры при проектировании, разработке и испытаниях командно-измерительных систем космических аппаратов. ПО КПА КИС и ПММ БА КИС установлены в АО «ИСС» на опытном участке по производству бортовой аппаратуры КИС. Программный комплекс использован при выполнении комплексного проекта Министерства образования и науки РФ № 02.G25.31.0041 «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».

Председатель комиссии:



/ С.И. Опенько

подпись

Члены комиссии:



/ С.А. Рябушкин

подпись



/ А.И. Вильданов

подпись

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»**

2014 г.



AKT № 1

о внедрении (использовании)
результатов интеллектуальной деятельности

Авторы от ИВМ СО РАН: Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Грузенко Е.А.,
Вогоровский Р.В., Марков А.А., Евсюков А.А., Колдырев А.Ю.

Регистрация прав на программное обеспечение передана Открытому акционерному обществу «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва».

Результаты внедрялись при выполнении научно-исследовательской работы (НИР) по теме: «Разработка составной части НИОКТР – программно-математической (имитационной) модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы» договор № 4430/13 от 01 августа 2013 г.

Применение результатов РИД позволило сократить время разработки и повысить эффективность и качество получаемых программных решений при разработке НИР (составной части НИОКР) по созданию программного комплекса «Программно-математическая (имитационная) модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы», предназначенного для комплексной автоматизированной поддержки конструирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

Председатель комиссии:

 / Алёшечкин А.М.
подпись

Члены комиссии:

 / Сухотин В.В.

 / Мишуров А.В.
подпись

5. Акт о внедрении РИД «Инструментальная среда имитационного моделирования программно-технических комплексов» в «СФУ»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Федеральному международному сотрудничеству
 ФГАОУ ВПО «СФУ»

Верховец С.В.

2014 г.



о внедрении (использовании)
результатов интеллектуальной деятельности

Комиссия в составе:

председатель: д-р. техн. наук, доцент Алёшечкин Андрей Михайлович, заведующий кафедрой «Радиоэлектронных систем»;

члены комиссии: канд. техн. наук, доцент Сухотин Виталий Владимирович, доцент кафедры «Радиоэлектронных систем»; Мишуров Андрей Валериевич, ассистент кафедры «Радиоэлектронных систем»

составили настоящий акт о внедрении и использовании результатов интеллектуальной деятельности, разработанных в ИВМ СО РАН:

«Инструментальная среда имитационного моделирования программно-технических комплексов»

авторы: Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко, Р.В. Вогоровский, А.Ю. Колдырев

свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014617786 от 04.08.2014 г.

Указанные программно-инструментальные средства внедрены в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» институт Инженерной физики и радиоэлектроники на кафедре «Радиоэлектронных систем».

Председатель комиссии:

Алёшечкин / Алёшечкин А.М.
 подпись

Члены комиссии:

Сухотин / Сухотин В.В.

подпись

Мишуров / Мишуров А.В.

подпись

Верховец

6. Акт о внедрении РИД «Инструменты графического моделирования программно-технических комплексов» в «СФУ»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

и международному сотрудничеству

ФГАОУ ВПО «СФУ»

Верховец С.В.

2014 г.



АКТ № 3

о внедрении (использовании)
результатов интеллектуальной деятельности

Комиссия в составе:

председатель: д-р. техн. наук, доцент Алёшечкин Андрей Михайлович, заведующий кафедрой «Радиоэлектронных систем»;

члены комиссии: канд. техн. наук, доцент Сухотин Виталий Владимирович, доцент кафедры «Радиоэлектронных систем»; Мишуров Андрей Валериевич, ассистент кафедры «Радиоэлектронных систем»

составили настоящий акт о внедрении и использовании результатов интеллектуальной деятельности, разработанных в ИВМ СО РАН:

«Инструменты графического моделирования программно-технических комплексов»

авторы: Л.Ф. Ноженкова, О.С. Исаева, Е.А. Грузенко, Р.В. Вогоровский

свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014617411 от 21.07.2014 г.

Указанные программно-инструментальные средства внедрены в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» институт Инженерной физики и радиоэлектроники на кафедре «Радиоэлектронных систем».

Председатель комиссии:

Алёшечкин / Алёшечкин А.М.

Члены комиссии:

Сухотин / Сухотин В.В.

Мишуров / Мишуров А.В.