

Интеллектуальный анализ испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата*

О. С. ИСАЕВА[†], Л. Ф. НОЖЕНКОВА, А. Ю. КОЛДЫРЕВ

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

[†]Контактный e-mail: isaeva@icm.krasn.ru

Показано применение прецедентов функционирования имитационной модели для анализа результатов испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата. Прецеденты содержат различные сценарии передачи команд управления и соответствующие им варианты изменения параметров телеметрии бортовых систем космического аппарата. Сценарии описываются правилами базы знаний и моделируются процедурами логического вывода. Разработанные структуры данных и программное обеспечение позволяют выполнять имитационные эксперименты, сохранять результаты в базе прецедентов и сопоставлять их с результатами испытаний бортовых систем как в процессе выполнения испытательных процедур, так и ретроспективно. Применение результатов имитационного моделирования расширяет возможности испытательного программного обеспечения и способствует повышению качества конструкторских решений.

Ключевые слова: база знаний, логический вывод, имитационное моделирование, бортовая аппаратура космического аппарата, испытания.

Библиографическая ссылка: Исаева О.С., Ноженкова Л.Ф., Колдырев А.Ю. Интеллектуальный анализ испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 3. С. 59–74.
DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.005.

Введение

Ведущие мировые производители космического оборудования разрабатывают и успешно внедряют в собственное производство технологии имитационного моделирования, переносимости и интеграции имитационных моделей на различных этапах жизненного цикла изготовления и эксплуатации космических систем [1]. Стандарты Европейского космического агентства отводят существенную роль технологиям моделирования, сопровождающим системную разработку всех процессов, протекающих при преобразовании технических требований в системные решения и являющихся основой развития космической отрасли [2, 3]. В мировой космической индустрии развиваются программные проекты, позволяющие моделировать технические системы до их изготовления и в дальнейшем использовать построенные модели при разработке и эксплуатации бортового оборудования [4]. Для поддержки импортонезависимости российских разработок и обеспечения их конкурентоспособности требуется проводить всесторонние исследования, направленные на создание отечественных технологических и программных

*Title translation and abstract in English can be found on page 73.

© ИВТ СО РАН, 2019.

инструментов имитационного моделирования, которые могли бы применяться на производстве космических систем.

Авторами данного исследования на протяжении многих лет разрабатывалось программное обеспечение, выполняющее имитационное моделирование [5], подготовку и проведение испытаний, а также обучение инженеров-конструкторов бортовой аппаратуры [6–8]. Созданы инструменты информационно-графического и интеллектуального моделирования, построены базы знаний, консолидирующие опыт специалистов предметной области [9]. Программное обеспечение успешно внедрено на предприятии-изготовителе спутниковых систем. Инструменты моделирования используются как на этапах проектирования, так и на этапах подготовки специалистов к эксплуатации технического оборудования.

При производстве космической техники важное значение имеют технологические процессы подготовки, проведения испытаний и анализа функционирования бортовой аппаратуры космических систем. Для автоматизации этих процессов необходимы подходы, которые позволили бы проводить имитационные эксперименты, исследовать работу бортового оборудования в зависимости от его назначения и условий эксплуатации и сопоставлять результаты моделирования с реальными параметрами физических устройств.

В настоящей работе описано применение метода анализа результатов испытаний бортовой аппаратуры космических систем на основе прецедентов имитационной модели. Имитационное моделирование позволяет выполнять проверку не только отдельных конструктивных деталей, но и логики работы устройств и комплексов, образующихся при взаимодействии объекта контроля со смежными системами и периферией. Предложены технологические подходы и созданы программные инструменты, позволяющие строить различные модели функционирования бортовой аппаратуры, проводить имитационные эксперименты, сохранять результаты моделирования и выполнять анализ испытаний космического оборудования по построенной базе прецедентов.

Обзор современных научных исследований показал актуальность применения имитационных моделей для анализа функционирования бортовой аппаратуры. В [10] представлен опыт использования имитационных моделей для разработки спутников дистанционного зондирования Земли MERLIN. Имитационное моделирование способствует повышению степени понимания инженерами-конструкторами работы бортовых систем, сокращению сроков проектирования и изготовления оборудования, повышению качества космических систем. Кроме того, оно применяется для оптимизации структуры, состава и размещения оборудования в соответствии с заданными требованиями по массогабаритным характеристикам, физическим свойствам и условиям эксплуатации. С помощью имитационного моделирования выполняются оценки функциональных характеристик отдельных элементов космических систем.

В [11] представлена имитационная модель космической командно-ретрансляционной системы, которая позволяет проводить оценку пространственной доступности радиоизлучения с позиции наземной станции радиомониторинга. Для оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли в [12] разработаны имитационные модели на основе разомкнутых сетей массового обслуживания. В научных исследованиях используются программные продукты для аналитического и имитационного моделирования сложных систем, среди которых AnyLogic, ExtendSim, Simulink [13], Matlab [11] и др., или создаются собственные программные инструменты [14, 15].

Разрабатываются модели и системы, позволяющие использовать методы интеллектуального моделирования функционирования технических объектов. В [4] для проектирования и тестирования спутников и его подсистем используются имитационные модели бортовой аппаратуры на основе базы правил. В [16] оценка параметров состояния технических объектов выполняется в нечетких границах, сформированных на основе формализованного опыта экспертов по степени влияния факторов неблагоприятных воздействий на надежность устройств.

Представленные разработки носят фрагментарный характер и не обеспечивают сквозной технологии поддержки конструирования бортовой аппаратуры. Для обеспечения универсальности и комплексности решений проводимые исследования должны основываться на международных стандартах космической отрасли и охватывать этапы жизненного цикла, входящие в технологический процесс производства. Приведенные в настоящей работе исследования позволяют расширить сферу применения имитационных моделей и автоматизировать анализ результатов испытаний бортовой аппаратуры спутниковых систем.

1. Задача испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата

Объект испытаний формально может быть представлен как функция, описывающая преобразование входных переменных в выходные с заданными граничными условиями и допустимыми изменениями входных параметров и измеряемых величин [17, 18], т. е. $O = \langle G, f(X, Y, T) \rangle$. Здесь O — объект испытаний; G — структура объекта; f — функция; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ — моменты измерений; $X = \{x_1(t), x_2(t), x_m(t), w_1(t), \dots, w_s(t)\}$ — множество входных воздействий в момент времени $t \in T$; $x_1(t), \dots, x_m(t)$ — входные параметры (параметры влияния); $w_1(t), \dots, w_s(t)$ — параметры функционирования объекта и внешней среды; $Y = \{y_1(t), \dots, y_p(t), d_1(t), \dots, d_q(t)\}$ — выходные параметры; $y_1(t), \dots, y_p(t)$ — контролируемые измерения; $d_1(t), \dots, d_q(t)$ — неконтролируемые данные.

Испытание рассматривается как совокупность параметров, управляющих воздействием и действий в процессе функционирования. Параметры подразделяются на телеметрические данные, физические характеристики объекта контроля и внутренние параметры системы испытаний, описывающие ее состояние. Управляющие воздействия оказывают влияние как на объект контроля, так и на систему испытаний. В процессе испытаний выполняются выдача управляющих воздействий, сбор и сохранение данных, получаемых от системы испытаний и объекта контроля, а также мониторинг и анализ параметров функционирования [19].

Одной из ключевых задач в организации испытаний является контроль выполнения функций приема, обработки и пересылки пакетов телекоманд и телеметрии между наземным комплексом управления и бортовыми системами космического аппарата. Схема информационного взаимодействия наземного и бортового комплексов управления показана на рис. 1.

Наземный комплекс управления передает команды (стрелка 1), которые получает бортовая аппаратура космического корабля. В соответствии со своим назначением команды делятся на бортовые и команды для командно-измерительной системы. Для начала все они поступают в бортовую аппаратуру командно-измерительной системы,

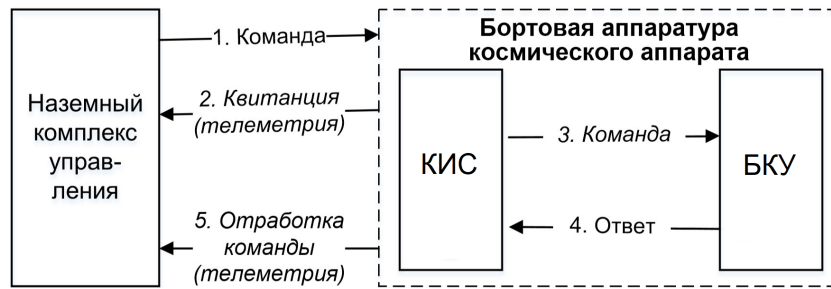


Рис. 1. Схема информационного взаимодействия

которая после приема добавляет в телеметрическую информацию квитанции о получении команд (стрелка 2). Далее, если команды предназначены для бортового комплекса управления (БКУ), они передаются по специальным интерфейсам в бортовые устройства (стрелка 3). Остальные команды анализируются и выполняются командно-измерительной системой (КИС). По результатам выполнения команд формируются квитанции, которые добавляются к телеметрической информации (стрелка 4). В телеметрии содержится информация о состоянии бортового оборудования в результате функционирования или обработки команд. Вся телеметрия собирается и передается в наземный комплекс управления (стрелка 5). При правильном функционировании выполнение каждой команды влияет на состояние бортовых систем и определенным образом отражается в телеметрии. Контроль обработки команд осуществляется в наземном комплексе управления по параметрам получаемой телеметрии.

Испытания включают сценарии передачи команд управления бортовой аппаратурой космического аппарата при различных вариантах состояния бортовых систем. Важным этапом подготовки и проведения испытаний является построение критериев оценки получаемых результатов. Такие критерии задаются либо в виде наборов граничных условий, эталонных значений, либо как прецеденты правильной работы объекта испытаний. Для автоматизированных систем тестирования выбор критериев оценки является наиболее важным элементом построения испытательных процедур [20]. Такой выбор выполняется инженером-конструктором на основе технической документации и дополнительных знаний о методах функционирования бортовой аппаратуры. В настоящее время это трудоемкий, ручной и подверженный ошибкам процесс. Широкий спектр команд управления и возможных вариантов значений параметров не позволяет в полной мере сформировать критерии оценки всех особенностей работы объекта контроля.

Испытательные инструменты не помогают в развитии методов построения таких критериев. Они предназначены для визуализации результатов, сигнализации выхода за граничные условия или несоответствия эталонным значениям, но не способствуют формированию рекомендаций по анализу данных. Для решения этой задачи требуется исследовать функцию $f(X, Y, T)$, выполняющую преобразование входных переменных в выходные. Построить ее аналитически не представляется возможным, поэтому предлагается заменить ее исследование анализом функционирования имитационной модели, которая будет вести себя подобно объекту контроля, формируя при заданных входных значениях аналогичные выходные результаты. Имитационное моделирование в общем случае представляет собой многоэтапный процесс исследования, направленный на выявление свойств и закономерностей, присущих объектам, с целью их проектирования или модернизации [18]. В нашем примере построение модели и проведение на ее основе

комплекса имитационных экспериментов позволят создать базу прецедентов правильного функционирования объекта контроля и проводить анализ испытаний, сопоставляя получаемые результаты с полученными прецедентами.

2. Построение имитационной модели бортовой аппаратуры

Исследование объекта испытаний $O = \langle G, f(X, Y, T) \rangle$ будем выполнять на имитационной модели $M = \langle G, R(X, Y, T) \rangle$ [21], где G — множество элементов структуры, R — множество методов функционирования, X — входные параметры, Y — выходные параметры, T — время моделирования. Множество G определяет структурно-параметрическое представление модели бортовой аппаратуры и описывает ее состояние в моменты времени T . Множество R формирует функциональное описание модели и является приближением функции f объекта испытаний.

Множество $G = \langle B, I, C, D \rangle$, где $B = \{B_i\}$ — блоки модели, имитирующие физические устройства, $I = \{I_i\}$ — коммутационные интерфейсы, $C = \{C_i\}$ — соединения между блоками по коммутационным интерфейсам, D — структуры данных.

Блоки $B_i = \langle N_i, K_i, I_i, X_i, Y_i \rangle$, где N_i — наименование i -го блока; K_i — тип (приемник, передатчик, бортовые системы и др.), $I_i = \{I_i^1, \dots, I_i^n\} \subseteq I$ — подмножество коммутационных интерфейсов блока B_i , n — количество точек входов и выходов B_i , $X_i = \{X_i^1, \dots, X_i^u\} \subseteq X$, $Y_i = \{Y_i^1, \dots, Y_i^p\} \subseteq Y$ — подмножества параметров блока модели B_i .

Каждый интерфейс $I_i^j \in I$ имеет характеристики: тип интерфейса $Tr(I_i^j) \subseteq RS-232, RS-422, SpaceWire, \text{высокочастотный (ВЧ), импульсный (имп.), релейный (рел.), питание}$; направленность передачи $Rt(I_i^j) \subseteq \text{Вх, Исх, Двн}$ — определяет входящий, исходящий или двунаправленный интерфейс; признак состояния $On(I_i^j) \subseteq \text{Вкл, Выкл}$ указывает на возможности передачи данных в текущий момент времени. На основе заданных характеристик коммутационных интерфейсов выполняется типизация информационных зависимостей между блоками. Типизация позволяет при проведении моделирования применять единые правила к представлению и обработке данных, передаваемых по однотипным интерфейсам.

Множество коммутационных соединений определяет направления взаимодействия элементов модели. Для блоков модели B_i и B_j может быть определено множество соединений $C_{ij} = C_{ij}^1, \dots, C_{ij}^r \subseteq C$. Здесь $C_{ij}^{nm} = \langle I_i^n, I_j^m, \tau_{ij} \rangle$, где I_i^n — n -й интерфейс B_i , I_j^m — m -й интерфейс B_j , τ_{ij} — время прохождения сигнала между интерфейсами. Соединение возможно только между однотипными интерфейсами: $Tr(I_i^n) = Tr(I_j^m)$.

Множество D структур данных модели содержит стандартные типы данных и специальные конструкции, описывающие пакеты телеметрии и телекоманд, с помощью которых осуществляется информационное взаимодействие бортовой аппаратуры. Введение дополнительных структур данных, характерных для моделируемой задачи, обеспечивает дополнительные механизмы анализа и визуализации как исходных данных, так и результатов моделирования. Параметры множеств X и Y представляются структурами данных, содержащихся в D .

Функциональное описание модели $R(X, Y, T) = A(X, T) \rightarrow Z(Y, T)$, где $A \rightarrow Z$ — правила базы знаний, A — условия, Z — действия. Условия A определяют, при каких состояниях элементов модели правила применимы. Действия Z определяют способы изменения состояний модели. Условия и действия представляют собой выражения над

переменными X, Y , заданными в структурно-параметрическом описании, либо функции преобразования данных.

Рассмотрим пример построения имитационной модели. Пусть имеются два бортовых устройства, осуществляющих информационное взаимодействие, т. е. $B = \{\text{Устройство 1}, \text{Устройство 2}\}$. Определим цели и задачи функционирования этих устройств. Предположим, одно из устройств формирует и передает данные другому, а то, в свою очередь, обрабатывает данные и возвращает их первому устройству. Пусть в нашей модели передаются аналоговые сигналы и цифровые пакеты данных. Всего имеются пять точек входа/выхода для каждого из элементов модели. Для передачи аналоговых сигналов каждое устройство имеет по соответствующему интерфейсу для приема и передачи данных, цифровые пакеты будут передаваться от первого устройства по интерфейсу $RS - 232$ и приниматься по $RS - 422$.

Множество коммутационных интерфейсов первого устройства: $I_1 = \{I_1^1, I_1^2, I_1^3, I_1^4, I_1^5\}$. $Tr(I_1^1) = BЧ, Tr(I_1^2) = RS - 232, Tr(I_1^3) = BЧ, Tr(I_1^4) = RS - 422, Tr(I_1^5) = Имн.$ $Rt(I_1^1) = Bx, Rt(I_1^2) = Bx, Rt(I_1^3) = Исx, Rt(I_1^4) = Исx, Rt(I_1^5) = Двн. \forall I_1^j Onf(I_1^j) = Bкл.$

Множество коммутационных интерфейсов второго устройства: $I_2 = \{I_2^1, I_2^2, I_2^3, I_2^4, I_2^5\}$. $Tr(I_2^1) = BЧ, Tr(I_2^2) = RS - 232, Tr(I_2^3) = BЧ, Tr(I_2^4) = RS - 422, Tr(I_2^5) = Рел.$ $Rt(I_2^1) = Исx, Rt(I_2^2) = Исx, Rt(I_2^3) = Bx, Rt(I_2^4) = Bx, Rt(I_2^5) = Двн. \forall I_2^j Onf(I_2^j) = Bкл.$

Для построения модели по формальному описанию применяется оригинальное программное обеспечение “Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата” [22]. Каждое из устройств представлено отдельным блоком графической модели, заданы коммутационные интерфейсы, типы и направления передачи данных в которых описаны ранее (рис. 2).

Свойство допустимости соединения коммутационных интерфейсов $Tr(I_i^n) = Tr(I_j^m)$ в программном обеспечении контролируется автоматически. Рекомендуемые соединения коммутационных интерфейсов отображаются зелеными стрелками, ошибочные — красными. Типизация интерфейсов отображается в модели различными цветовыми линиями.

Определим методы функционирования имитационной модели из нашего примера. Для создания правил используется интерфейс программного обеспечения, который позволяет из выпадающих списков выбирать блоки модели, коммутационные интерфейсы, переменные и допустимые действия по преобразованию данных (рис. 3).

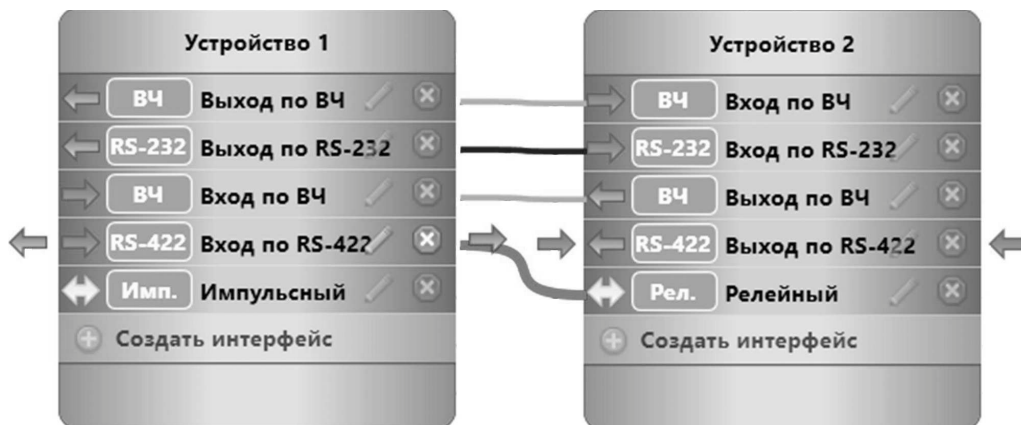


Рис. 2. Пример графического представления модели



Рис. 3. Пример правила для задания логики работы модели

Устройство 1 передает данные устройству 2 по коммуникационному интерфейсу $RS - 232$. Устройство 2 получает данные в виде массива байтов, выбирает из принятого пакета два байта, возвращает их в устройство 1 по интерфейсу $RS - 422$. Эти действия в функциональном описании модели будут представлены следующим правилом: $A_1 \rightarrow Z_1$, где A_1 = “Если по интерфейсу “Вход по $RS - 232$ ” получены данные”, Z_1 = “Записать данные в переменную “Массив байтов” и передать данные по интерфейсу “Выход по $RS - 422$ ” из переменной “Массив байтов” 2 байта начиная с 1-го”. Подобным образом может быть задано взаимодействие блоков модели и по другим коммутационным интерфейсам.

Рассмотрим пример правил, описывающих запрос на формирование телеметрии: устройство 1 по интерфейсу ВЧ передает устройству 2 команду на формирование телеметрии, устройство 2 сравнивает запрос с заданным параметром и в случае совпадения начинает с определенной периодичностью формировать и выдавать телеметрию, дополнительной командой изменяется скорость передачи телеметрии.

Дополним функциональное описание правилами: $\{A_2 \rightarrow Z_2, A_3 \rightarrow Z_3, A_4 \rightarrow Z_4\}$, где

Правило $A_2 \rightarrow Z_2$

Если по интерфейсу “Вход по ВЧ” получены данные
И переменная “Режим формирования ТМ” = “Нет”
И полученный массив байтов = переменная “Запрос ТМ”
То запустить таймер “Формирование телеметрии”
И переменная “Режим формирования ТМ” = “Да”

Правило $A_3 \rightarrow Z_3$

Если сработал таймер “Формирование телеметрии”
И переменная “Режим формирования ТМ” = “Да”
То передать переменную “Телеметрия” по интерфейсу “Выход по ВЧ”
И скорость передачи телеметрии = переменная “Скорость телеметрии”

Правило $A_4 \rightarrow Z_4$

Если по интерфейсу “Вход по $RS - 232$ ” получены данные
И полученный массив байтов = “2F”
То переменная “Скорость телеметрии” = 1000 бит/с

Показанный способ формирования модели позволяет просто и наглядно создавать различные варианты конфигурации и работы бортовых систем. Использование семан-

тических структур, отражающих термины предметной области, и правил для описания методов функционирования позволяет инженеру-конструктору, обладающему специальными знаниями о способах работы бортовых систем космического аппарата, легко построить и в дальнейшем модифицировать имитационную модель без наличия навыков программирования. Для удобства построения моделей в программном обеспечении разработаны конфигурации базовых элементов бортовой аппаратуры и типичные правила их функционирования.

3. Построение базы прецедентов имитационной модели

Для анализа испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата на основе результатов имитационного моделирования построена модель (рис. 4), реализующая схему информационного взаимодействия бортовой аппаратуры (см. рис. 1). Модель в полной мере отражает работу оборудования при приеме, обработке и передаче команд управления, а также при формировании и контроле телеметрической информации. Используются следующие обозначения имитаторов, моделирующих функции бортовых устройств

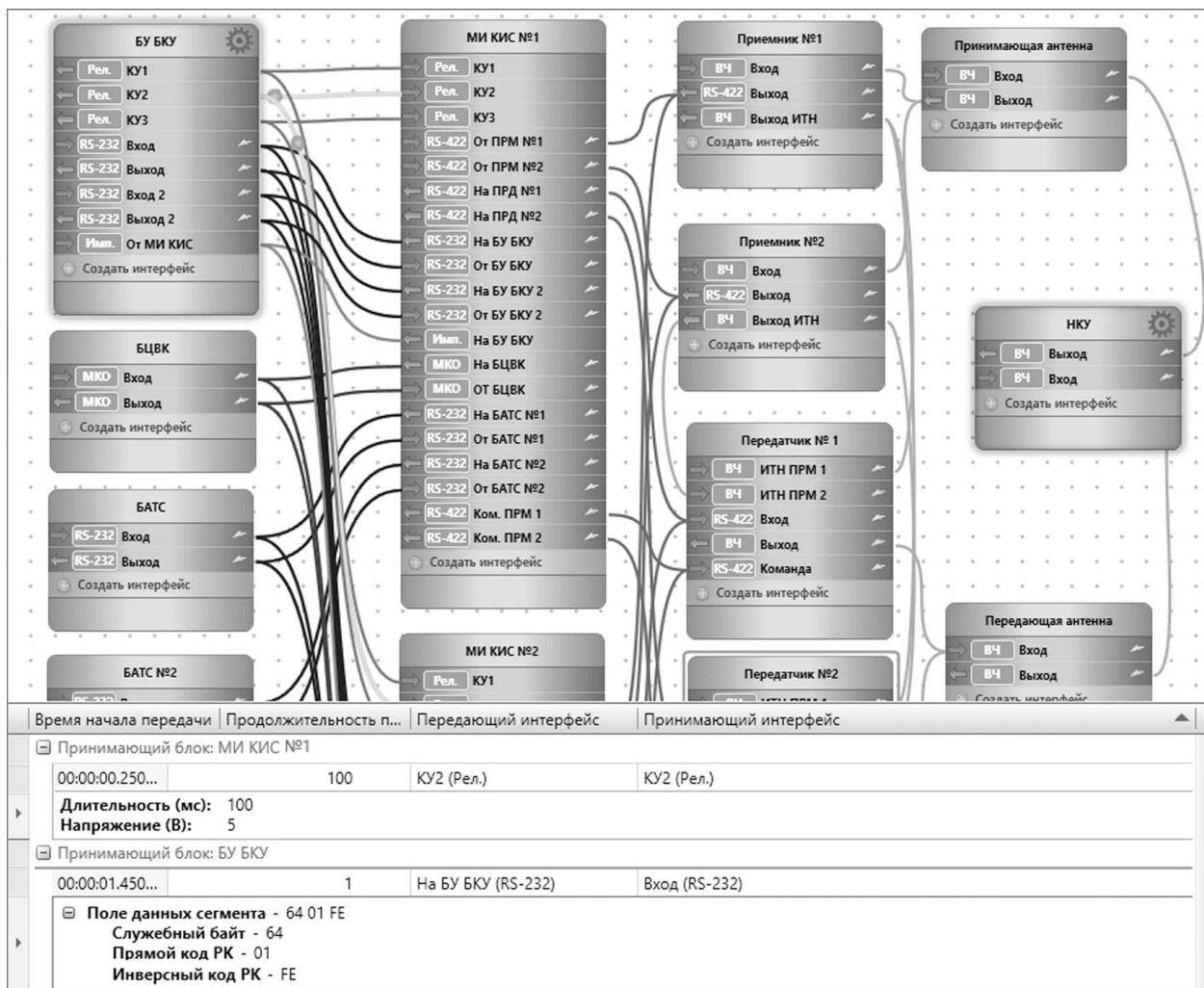


Рис. 4. Графическое представление имитационной модели

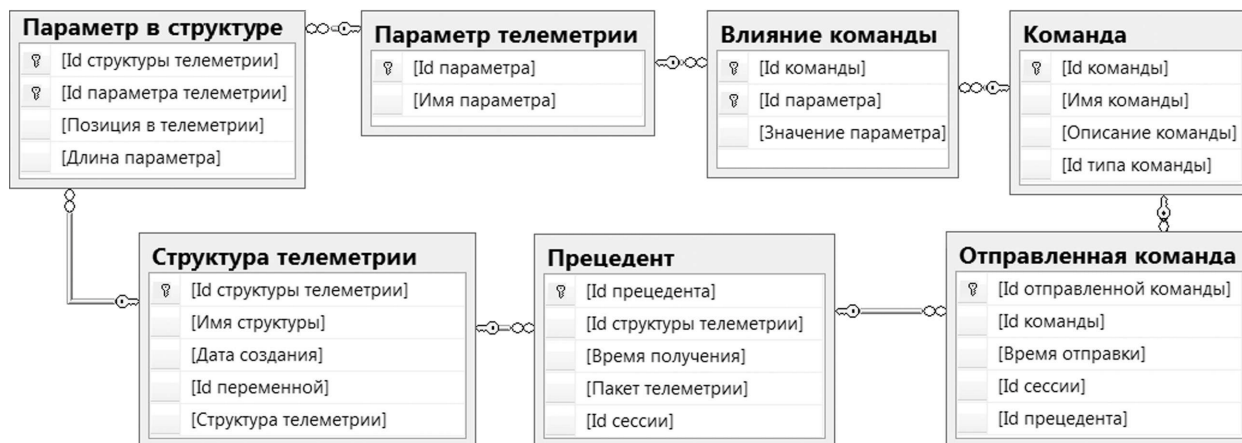


Рис. 5. Фрагмент структур данных базы прецедентов имитационной модели

при выполнении командно-программного управления [23]: БУ БКУ — бортовой комплекс управления; БЦВК — бортовой цифровой вычислительный комплекс; БАТС — бортовая аппаратура телесигнализации; МИ КИС — интерфейсный модуль командно-измерительной системы; Приемник, Передатчик и Антенна — устройства, моделирующие приемопередающий тракт для анализа ошибок на линии и потерь данных, НКУ — имитатор функций наземного комплекса управления.

База знаний имитационной модели содержит более ста правил, описывающих различные особенности функционирования бортовой аппаратуры, способы отработки команд и методы изменения параметров устройств. Рассмотрены как стандартные функции оборудования, так и нештатные ситуации, возникающие при недопустимых значениях параметров, отключениях устройств и переходах к работе на резервных комплектах оборудования. В качестве протоколов передачи данных использованы стандарты Европейского космического агентства: ESA PSS-04-107 для телекоманд и ESA PSS-04-106 для телеметрии. В процессе имитационного моделирования визуализируются направления передачи данных, состояния элементов модели и результаты моделирования.

Для создания базы прецедентов разработаны структуры данных (рис. 5) и программное обеспечение, позволяющие сохранять результаты выполнения имитационных экспериментов. База данных содержит таблицы для записи правил, их зависимостей и последовательностей выполнения, параметров телеметрии, состояния элементов модели, а также пакетов команд и телеметрии.

Проведены имитационные эксперименты, моделирующие отправку бортовых команд управления, формирование телеметрической информации, изменение режимов работы оборудования и характеристик приемопередающего тракта, переключение на резервные комплекты устройств и пр. В результате сформирована база прецедентов имитационной модели для анализа результатов испытаний работы бортового оборудования космического аппарата.

4. Испытания командно-программного управления

Для проведения испытаний применяется программно-аппаратный космический комплекс «Контрольно-проверочная аппаратура командно-измерительной системы космического аппарата» [24] (рис. 6). Подготовка испытательных процедур командно-программного управле-

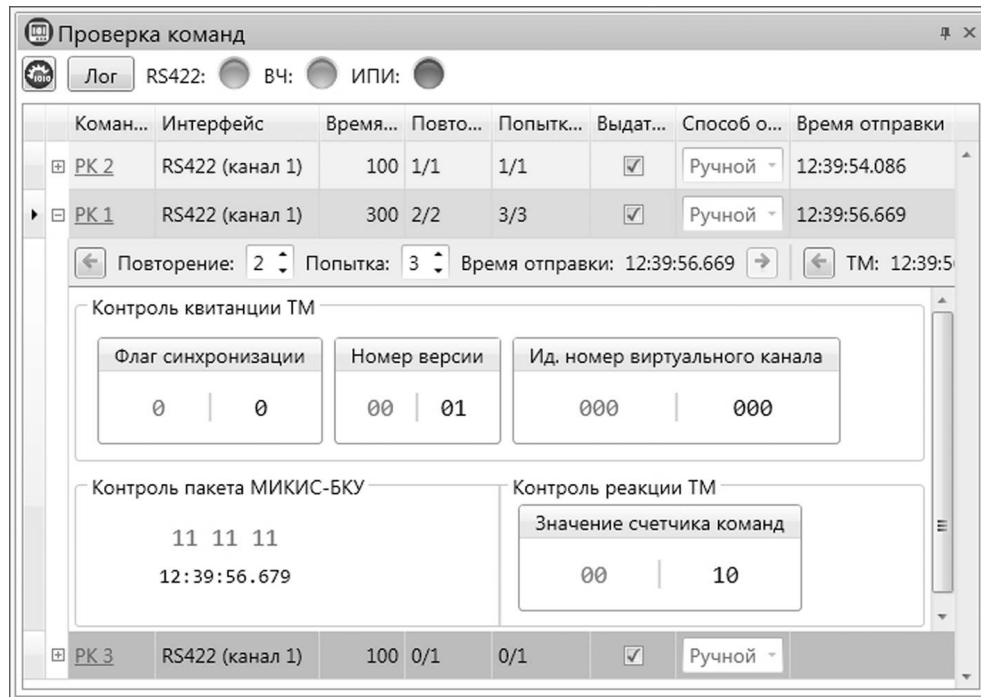


Рис. 6. Мониторинг испытаний командно-программного управления

ния заключается в задании перечня бортовых команд, методов приема-передачи и параметров телеметрической информации, по которым будет выполняться мониторинг. В процессе проведения испытаний программное обеспечение выполняет передачу команд в соответствии с заданными параметрами и отображает результаты ее отработки испытываемым бортовым оборудованием. Сведения об отработке команд включают время отправки команды, время получения реакции в телеметрии, счетчики повторений и выполненных попыток, а также контролируемые значения. Результаты сравнения контрольных значений с полями получаемой телеметрии отображаются в окне мониторинга. После проведения испытаний все результаты сохраняются в базе данных, программное обеспечение позволяет просматривать ход проведения испытаний, выполняемые действия и полученные результаты.

Отправка команд, их получение, квитирование, отработка, изменение параметров приемопередающего тракта, а также состояние бортовых систем отображаются в отдельных параметрах телеметрической информации. При формировании испытательных процедур инженер-конструктор может выбрать необходимые параметры телеметрии для контроля. Однако существенное количество бортовых команд, различных параметров и состояний бортовых систем, а также большой объем получаемой телеметрии затрудняют проведение анализа. Применение прецедентов расширяет возможности программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры и позволяет рассматривать все варианты значений параметров телеметрии, полученные при различных состояниях бортовых систем. Алгоритм анализа испытаний по базе прецедентов показан на рис. 7.

На начальном этапе работы алгоритма выбираются данные для сравнения и формируются TM_List — список телеметрии, полученной при испытаниях объекта контроля (бортовой аппаратуры), и $Prec_List$ — список телеметрии, полученной при проведении

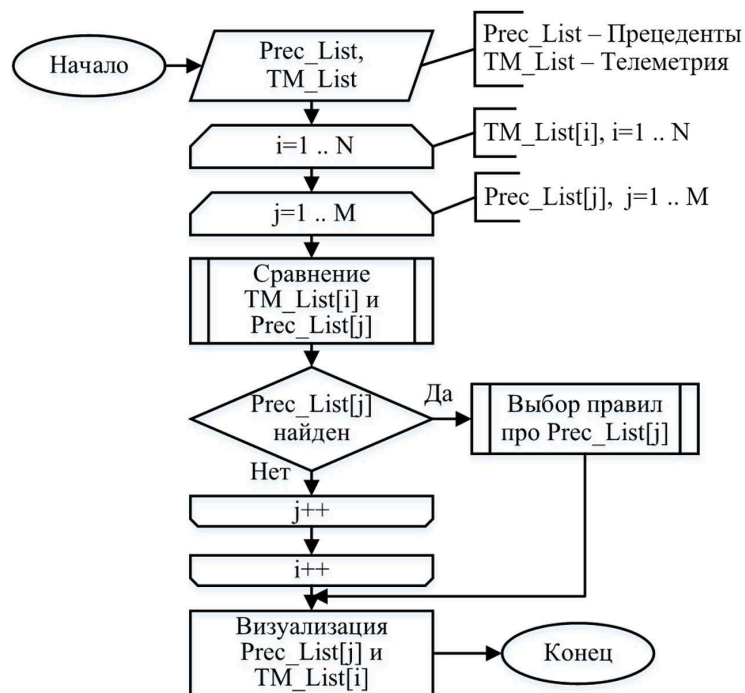


Рис. 7. Алгоритм анализа испытаний по базе прецедентов имитационной модели

имитационного моделирования и сохраненной в базе прецедентов. Выполняются поиск параметров в телеметрии прецедентов и их сравнение с телеметрией объекта контроля. В случае совпадения формируется набор параметров и правил, которые описывают последовательности действий имитационной модели, соответствующий найденному прецеденту.

Имитационная модель основывается на технической и конструкторской документации и в полной мере описывает функционирование реального бортового оборудования, поэтому сравнение телеметрии, получаемой при испытаниях с базой прецедентов, позволяет выявить особенности работы, которые могут остаться не замеченными конструктором при анализе отдельных параметров. Прецедент содержит не только корректные результаты отработки команд, но и наборы правил базы знаний, которые выполнялись для получения прецедента. Применение интеллектуальных методов логического вывода для формирования прецедентов обеспечивает детальное описание действий, которые привели к получению тех или иных значений параметров телеметрической информации. Реализация алгоритма выполнена в подсистеме анализа испытаний по прецедентам, которая встроена в программное обеспечение имитационного моделирования и систему подготовки и проведения испытаний (рис. 8).

Результаты работы алгоритма визуализируются в программном обеспечении. Конструктору предоставляются пакет телеметрии, содержащий параметры из базы прецедентов, а также правила базы знаний, выполненные для получения найденного прецедента. Правила показывают параметры работы оборудования, конфигурацию приемопередающего тракта, скорость передачи данных, активные коммутационные интерфейсы и пр. Отображение правил в терминах предметной области обеспечивает наглядность прецедентов и расширяет знания конструктора о состоянии испытываемого оборудования. Имеется возможность выполнить обратную трассировку правил для детализации происходивших в модели действий.

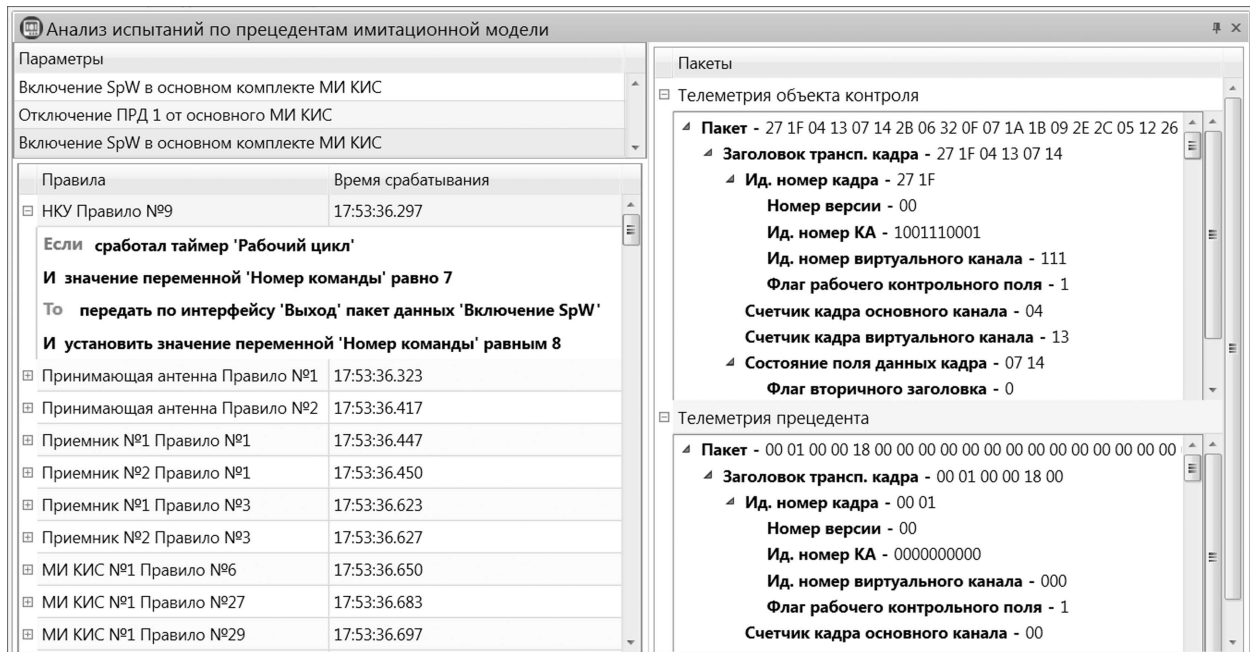


Рис. 8. Сравнение телеметрии испытаний и базы прецедентов

Анализ испытаний проводится как после их завершения, так и непосредственно в процессе испытательных процедур. В первом случае производится сравнение телеметрии бортовых систем, представленной в хранилище результатов испытаний, с прецедентами имитационной модели из базы данных. При совпадении параметров телеметрии визуализируются правила имитационной модели, которые были выполнены для получения данного прецедента. Подсистема проведения испытаний позволяет восстанавливать ход проведенных испытаний и пошагово просматривать результаты. Конструктор может сравнивать действия модели и выполненные испытательные процедуры, соответствующие совпадающим параметрам телеметрии, и делать выводы об особенностях работы объекта испытаний.

Для анализа результатов в процессе проведения испытаний выбранная конструктором команда управления бортовыми системами отправляется в объект контроля (см. рис. 6), и одновременно она поступает на вход в имитационную модель (см. рис. 4). Реализованные в модели методы логического вывода формируют конфликтный набор правил, выбирают и выполняют применимые действия, моделируя функции бортовых систем при получении и обработке заданной команды. Результаты моделирования отражаются в телеметрии, которая сравнивается с телеметрией, получаемой от объекта испытаний. Конструктору предоставляется перечень параметров телеметрии, которые были изменены в процессе логического вывода. По совпадению их с параметрами телеметрии объекта испытаний может быть сделан вывод о корректности работы бортовых систем. Несовпадение результатов имитационного моделирования и испытаний может свидетельствовать о проблемах в работе оборудования и необходимости дополнительных исследований.

Заключение

Применение прецедентов функционирования имитационной модели для анализа испытаний бортовых систем космического аппарата расширяет возможности программного

обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры. Как правило, анализ соответствия испытываемых устройств техническим заданиям требует от конструктора бортовой аппаратуры высокой квалификации и глубоких знаний о различных особенностях ее функционирования. В предложенном нами подходе имитационная модель строится на основе конструкторских документов и протоколов информационного взаимодействия, что не только позволяет наглядно исследовать работу бортовой аппаратуры на этапе моделирования, но и служит основой для анализа уже изготовленного оборудования.

Разработанные структура базы данных и программное обеспечение позволяют выполнять различные имитационные эксперименты и сохранять их результаты в базе прецедентов. Прецеденты отражают изменения телеметрии бортовых систем при моделировании командно-программного управления космическим аппаратом. Широкий спектр команд и значений параметров телеметрии формирует полную базу прецедентов имитационной модели.

Сопоставление телеметрии прецедентов имитационного моделирования с результатами испытаний бортовой аппаратуры позволяет выявлять особенности функционирования, которые могли остаться незамеченными при других методах анализа испытаний. Предложенный в работе подход повышает качество тестирования оборудования и эффективность анализа конструкторских решений.

Список литературы / References

- [1] Simulation modelling platform. ECSS E-40-07. Netherlands: ESA Requirements and Standards Division ESTEC, 2011. 49 p.
- [2] Space engineering. System engineering general requirements. ECSS-E-ST-10C. Netherlands: European Cooperation for Space Standardization, 2009. 100 p.
- [3] Space engineering. Testing. ECSS-E-ST-10-03C. Netherlands: European Cooperation for Space Standardization, 2012. 128 p.
- [4] **Eickhoff, J.** Simulating spacecraft systems. Springer Aerospace Technology, 2009. 376 p.
- [5] **Nozhenkova, L., Isaeva, O., Gruzenko, E.** Computer simulation of spacecraft onboard equipment // ACSR-Advances in Computer Science Research (CISIA 2015). 2015. Vol. 18. P. 943–945. DOI: 10.2991/cisia-15.2015.255.
- [6] **Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Вогоровский Р.В., Мишуров А.В.** Формирование процедур внешнего командно-программного управления для испытаний командно-измерительной системы космического аппарата // Исследования наукограда. 2017. № 4(22). С. 175–183.
Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S., Vogorovskiy, R.V., Mishurov, A.V. Formation of procedures of the external command-and-software control for testing the spacecraft command-and-measuring system // The Res. of the Sci. City. 2017. No. 4(22). P. 175–183. (In Russ.)
- [7] **Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S., Vogorovskiy, R.V.** Scenario approach to testing spacecraft's onboard equipment command and software management // DEStech Transactions on Engineering and Technology Research (TMCM2017). 2017. P. 53–57. DOI: 10.12783/dtetr/tmcm2017/12614.
- [8] **Исаева О.С., Грузенко Е.А., Вогоровский Р.В., Колдырев А.Ю.** Моделирование и анализ функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Информатизация и связь. 2015. № 1. С. 58–64.
Isaeva, O.S., Gruzenko, E.A., Vogorovskiy, R.V., Koldyrev, A.Yu. Modelling and analysis of functioning of the spacecraft command and measuring system // Informatizatsiya i Svyaz'. 2015. No. 1. P. 58–64. (In Russ.)

- [9] **Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Евсюков А.А.** Инструменты компьютерного моделирования функционирования бортовой аппаратуры космических систем // Тр. СПИИРАН. 2018. Вып. 56. С. 144–168. DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.56.7>.
Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S., Evsyukov, A.A. Tools of computer modelling of the space systems' onboard equipment function // SPIIRAS Proc. 2018. No. 56. P. 144–168. (In Russ.)
- [10] **Strzepak, A., Esteve, F., Salas, S. et al.** A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission // Proc. of 14th Intern. Conf. on Space Operations. N.Y.: Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics, 2016. 1736–1746.
- [11] **Андреев А.М., Хацаюк В.О.** Алгоритм оценивания пространственной доступности радиоизлучений космических аппаратов командно-ретрансляционных систем с использованием имитационного моделирования // Тр. военно-косм. акад. им. А.Ф. Можайского. 2016. № 650. С. 57–61.
Andreev, A.M., Khatsayuk, V.O. Algorithm for estimating the spatial availability of radio emissions of spacecraft command-retransmission systems using simulation simulations // Proc. of the Mozhaisky Military Space Acad. 2016. No. 650. P. 57–61. (In Russ.)
- [12] **Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Лохвицкий В.А.** Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли // Тр. СПИИРАН. 2016. Вып. 3(46). С. 49–64.
Khomonenko, A.D., Starobinets, D.Yu., Lokhvitsky, V.A. A model of estimating quickness of functioning of onboard control systems of spacecraft remote sensing of the Earth // SPIIRAS Proc. 2016. No. 3(46). P. 49–64. (In Russ.)
- [13] **Якимов И.М., Кирпичников А.П., Трусфус М.В., Мокшим В.В.** Сравнение систем структурного и имитационного моделирования Anylogic, Extendsim, Simulink // Вестн. технолог. ун-та. 2017. Т. 20, № 15. С. 118–122.
Yakimov, I.M., Kirpichnikov, A.P., Trusfus, M.V., Mokshim, V.V. Comparison of structural and simulation modelling systems Anylogic, Extendsim, Simulink // Bull. of the Technological Univ. 2017. Vol. 20, No. 15. P. 118–122. (In Russ.)
- [14] **Жихарев А.Г., Корчагина К.В., Бузов П.А. и др.** Об имитационном моделировании производственно-технологических систем // Научный результат. Информ. технологии. 2016. Т. 1, № 3. С. 24–31.
Zhikharev, A.G., Korchagina, K.V., Buzov, P.A. et al. About simulation modeling of production and technological systems // Res. Result. Inform. Technologies. 2016. Vol. 1, No. 3. P. 24–31. (In Russ.)
- [15] **Миков А.И., Замятина Е.Б.** Опыт использования методов искусственного интеллекта при разработке систем имитации // Матер. конф. “Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века”. Пермь, 2016. С. 19–23.
Mikov, A.I., Zamyatina, E.B. The experience of the simulation system development using the methods of artificial intelligence // Proc. of the Conf. “Artificial Intelligence in the Solution of Current Social and Economic Problems of the XXI Century”. Perm: PGNIU, 2016. P. 19–23. (In Russ.)
- [16] **Миронов А.Н., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л., Платонов С.А.** Исследование вопросов моделирования границ области работоспособности элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадиях создания и эксплуатации // Фундамент. исследования. 2015. № 2-13. С. 2815–2818.
Mironov, A.N., Mironov, E.A., Shestopalova, O.L., Platonov, S.A. Research of questions modeling of border areas functioning elements of onboard equipment spacecraft at the stage of creation and operation // Fundamental Research. 2015. No. 2-13. P. 2815–2818. (In Russ.)

- [17] **Раннев Г.Г.** Измерительные информационные системы. М.: Академия, 2010. 336 с.
Rannev, G.G. Measuring information systems. Moscow: Akademiya, 2010. 336 p. (In Russ.)
- [18] **Муравьева-Витковская Л.А.** Моделирование интеллектуальных систем. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 145 с.
Muraveva-Vitkovskaya, L.A. Modelling of intelligent systems. SPb.: NIU ITMO, 2012. 145 p. (In Russ.)
- [19] **Барков А.В.** Структура проблемно-ориентированного языка испытаний космических аппаратов // Вестн. СибГАУ. 2006. № 5. С. 14–18.
Barkov, A.V. Structure of the problem-oriented language of spacecrafts tests // Vestn. SibGAU. 2006. No. 5. P. 14–18. (In Russ.)
- [20] **Tretmans, J., Belinfante, A.** Automatic testing with formal methods // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Software Testing, Analysis, Review (EuroSTAR'99). 1999. P. 8–12.
- [21] **Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Грузенко Е.А.** Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычисл. технологии. 2015. Т. 20, № 3. С. 33–45.
Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S., Gruzenko, E.A. The method for system modelling of the spacecraft on-board equipment // Comput. Technologies. 2015. Vol. 20, No. 3. P. 33–45. (In Russ.)
- [22] **Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Грузенко Е.А.** Построение программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Информатизация и связь. 2014. № 1. С. 87–93.
Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S., Gruzenko, E.A. Designing the program-mathematical model for the spacecraft command and measuring system // Inform. i Svyaz'. 2014. No. 1. P. 87–93. (In Russ.)
- [23] Системы и комплексы космические. Термины и определения. ГОСТ Р 53802-2010. М.: Стандартиформ, 2011. 28 с.
Space systems and complexes. Terms and Definitions. GOST R 53802-2010. Moscow: Standartinform, 2011. 28 p. (In Russ.)
- [24] **Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Вогоровский Р.В.** Автоматизация испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата // Автоматизация. Совр. технологии. 2017. Т. 71, № 4. С. 184–188.
Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S., Vogorovskiy, R.V. The command and program control test automation of the spacecraft on-board facility // Avtomatizatsiya. Sovr. Tekhnologii. 2017. Vol. 71, No. 4. P. 184–188. (In Russ.)

*Поступила в редакцию 15 августа 2018 г.,
с доработки — 5 сентября 2018 г.*

Intellectual analysis for testing of spacecraft onboard equipment

ISAEVA, OLGA S.*, NOZHENKOVA, LUDMILA F., KOLDYREV, ANDREY YU.

Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, 660036, Russia

*Corresponding author: Isaeva, Olga S., e-mail: isaeva@icm.krasn.ru

This article represents a method for intellectual analysis of the results of testing spacecraft onboard equipment on the bases of the precedents of the simulation model.

A simulation model is founded on a knowledge base describing different peculiar properties of the onboard equipment's function, settings of the reception-transmission tract, scenarios of control commands' transmission and corresponding changes of the parameters of onboard devices' telemetry.

We have designed data structures and software that allows conducting simulation experiments, save them in the precedent base and compare the results of the simulation modelling with the results of the onboard system's testing. This analysis is carried out both during tests and after they are finished.

In the first case, an onboard systems' command is sent to the object of testing and to the simulation model. The model contains methods of logical inference that forms a conflict set of rules, choose and complete the applied actions simulating the functions of onboard equipment at reception and execution of the given commands. The results of modelling are represented in telemetry that is compared with the telemetry received from the objects of testing. A designer is given a list of parameters that were changed in the process of the logical inference and the telemetry parameters of the object of testing.

In the other case, the telemetry of the onboard system obtained from the test storage results is compared with the precedents of the simulation model from the data base. Precedents contain examples of execution of big variety of commands and sets of the rules of the knowledge base that were completed for their acquisition. If telemetry parameters coincide, software allows a step-by-step review of the tests thus making a comparison with the actions of the simulation model.

Comparison of the simulation model precedents with the results of testing allows revealing special features of the onboard equipment function that may remain unnoticed when other methods of analysis are utilized. Intellectual methods of logical output for analysis of tests extend the capabilities of test software and provide better quality of designer solutions.

Keywords: knowledge base, inference, simulation modelling, spacecraft onboard equipment, testing.

Cite: Isaeva, O.S., Nozhenkova, L.F., Koldyrev, A.Yu. Intellectual analysis for testing of spacecraft onboard equipment // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 3. P. 59–74. (In Russ.) DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.005.

Received August 15, 2018

Received in revised form September 5, 2018