

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.94

DOI: 10.17223/19988605/57/3

О.С. Исаева, Н.В. Кулясов, С.В. Исаев

ИНФОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОДДЕРЖКИ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Предложен метод поддержки испытаний логики функционирования бортовых систем космических аппаратов на основе базы знаний интеллектуальной имитационной модели. Исследуемые физические устройства представляются цифровыми образами в элементах модели, которая содержит графические структуры и базы знаний, описывающие правила работы устройств. Создан метод формирования правил базы знаний из программ испытаний бортовых систем. Разработаны визуальные компоненты интерактивной инфографики, позволяющие выполнять сопоставление эталонной базы знаний, отражающей проектные решения, с базой знаний, построенной по испытаниям технических систем. Созданные программные инструменты применяются для исследования командно-измерительных систем космических аппаратов в составе программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры. Новые инструменты позволяют конструктору бортовой аппаратуры оценивать полноту программ проводимых испытаний как в комплексе, так и для отдельных реализаций основных и резервных комплектов бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: имитационное моделирование; интеллектуальная модель; базы знаний; инфографика; бортовые системы; космический аппарат; испытания.

В современном цифровом мире технологии имитационного моделирования обеспечили переход от традиционного проектирования и итерационной доработки технических систем на основе дорогостоящих многократных натурных испытаний к анализу критических состояний изделий на цифровых моделях. Модели позволяют исследовать разрабатываемые устройства, имитируя нештатные ситуации, определяя временные интервалы наблюдений, задавая контрольные точки, допустимые границы параметров, и решают проблемы, связанные с необходимостью рассматривать процессы, которые сложно многократно повторять в реальных условиях [1].

В случае, когда речь идет о создании сложной высокотехнологичной несерийной продукции, к какой относится, например, бортовая аппаратура космических аппаратов, применение существующих инструментов моделирования осложняется слабой структурированностью предметной области и неполнотой формализованных знаний о решаемых задачах. Особенностью бортовых систем является наличие в них внутренних программ, обеспечивающих сложную логику информационного взаимодействия бортовых и наземных сегментов на основе собственных протоколов и специализированных структур данных. Требуется проводить не только измерительный контроль, но и функциональное исследование бортовых систем, от качества которого во многом зависят срок службы космических аппаратов и их эксплуатационные характеристики [2]. Интуитивные, неструктурированные и формально не обоснованные последовательности действий при исследовании бортовых систем приводят к увеличению стоимости, времени и трудозатрат производства. Указанные проблемы решаются созданием программных инструментов, обеспечивающих построение и применение имитационных моделей, интегрированных с технологиями анализа и верификации устройств [3], для анализа функционирования бортовых систем, которые позволят снизить трудоемкость и повысить автоматизацию испытательных процессов.

В российских и зарубежных исследованиях накоплен широкий опыт применения готовых инструментов моделирования, а также создания программных систем для анализа функционирования технических объектов. Имитационные модели позволили выполнять контроль оперативности бортовых комплексов управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли [4], интеллектуальные модели на основе правил, представляющих матрицы векторов состояний и последовательности управляющих действий, применяются для обнаружения и парирования возникающих на их борту отказов оборудования [5], модели служат основой для оценки пространственной доступности радиоизлучений в космической командно-ретрансляционной системе при решении задач планирования мониторинга радиолинии [6] и пр. На основе баз знаний и моделей предметной области решаются задачи автоматизированной поддержки проектирования космических аппаратов [7], а также выработки новых решений для улучшения эксплуатационных характеристик технических систем [8]. Для анализа и контроля бортовых систем создаются специализированные языки или программные комплексы [9, 10]. Применение программных имитаторов для испытания блоков управления системы наведения антенн позволило выявлять сбои выдачи команд управления, связанные с попаданием прихода команды на момент обработки прибором информации о местоположении антенны [11], исследование нечетких границ работоспособных состояний бортовой аппаратуры, функции принадлежности которых построены на основе экспертных знаний, обеспечило прогнозирование показателей качества бортовых систем и учет влияния факторов внешних воздействий [12]. Применение экспертных знаний позволяет имитировать динамическое поведение анализируемых объектов и используется на всех этапах жизненного цикла бортовых систем для их проектирования, проверки работоспособности, при эксплуатационном контроле и диагностике отказов оборудования [13]. Проведенный обзор показал, что, несмотря на актуальность и востребованность темы исследований, существующие в настоящее время решения не обеспечивают тесной интеграции имитационных моделей и инструментов поддержки испытаний.

Авторами данной работы предложен комплекс методов интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов, позволяющий строить модели, описывающие логику работы систем и их технические характеристики, и применять их для автоматизации формирования испытательных процедур, проведения испытаний бортовой аппаратуры и анализа их результатов по прецедентам имитационного моделирования [14]. Построенные модели выполняют роль имитаторов окружения объекта контроля при автономных испытаниях бортовых систем. Методы позволяют проводить исследование отдельных функций бортовых систем, выполнение последовательных или параллельных действий, но не обеспечивают контроль режимов работы устройств в целом. Для решения этой задачи авторами предложен инфографический метод, позволяющий из испытательных процедур и данных, полученных в результате испытаний объекта контроля, создавать правила функционирования имитационных моделей и графические представления, показывающие полноту испытательных процедур и корректность режимов работы исследуемых систем. Апробация метода выполнена для бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Схема командно-телеметрического взаимодействия бортовых и наземных систем для управления космическим аппаратом приведена на рис. 1.

Ключевую роль в управлении играет командно-измерительная система (КИС), которая представляет собой радиотехнические средства наземного автоматизированного комплекса управления в совокупности с бортовой аппаратурой космического аппарата, предназначенные для приема и передачи различных видов информации, формирования и передачи на космические аппараты команд и программ управления, стандартных частот и сигналов времени для синхронизации работы бортового комплекса управления [15]. В ее состав входят устройства приема данных, их передачи и интерфейсный модуль, предназначенный для анализа и выполнения команд. 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 обработки команд отражаются в телеметрии и в квитанции, передаваемой командно-измерительной системой в наземный сегмент.



Рис. 1 Схема командно-телеметрического взаимодействия систем
Fig. 1. Scheme of command-telemetric interaction of systems

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. Современные требования к космическим аппаратам, сокращение сроков их разработки и увеличение периода активного существования обуславливают необходимость поиска новых подходов к проведению испытаний бортовых систем.

1. Постановка задачи испытаний бортовых систем

Задача испытаний заключается в формировании и передаче последовательности управляющих воздействий на объект контроля и обеспечении сбора, мониторинга и анализа данных, возникающих в результате его функционирования [16]. В процессе испытаний участвуют контрольно-проверочная аппаратура (КПА) и программное обеспечение (ПО КПА). 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 ; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_o\}$ – моменты измерений; $X = \{x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_m(t_i), w_1(t_i), \dots, w_s(t_i), k_1(t_i), k_2(t_i), \dots, k_r(t_i)\}$ – множество входных воздействий; $x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_m(t_i)$ – входные параметры (параметры влияния); $w_1(t_i), \dots, w_s(t_i)$ – параметры функционирования измерительного оборудования; $k_1(t_i), k_2(t_i), \dots, k_r(t_i)$ – команды управления из базы команд K , m – число входных параметров, s – параметров функционирования, r – команд; $Y = \{y_1(t_j), y_2(t_j), \dots, y_n(t_j), d_1(t_j), \dots, d_p(t_j)\}$ – 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 параметров; $t_i, t_j \in T, t_j = t_i + \Delta t, \Delta t$ – таймаут ожидания данных. Входные параметры испытаний X описывают настройки приемо-передающего тракта, характеристики измерительного оборудования, команды управления и массивы контрольно-проверочной информации (КПИ). Выходные параметры Y : телеметрические данные (ТМ), квитанции, физические характеристики объекта контроля и параметры системы испытаний, описывающие ее состояние.

Задача испытаний объекта контроля ставится следующим образом: показать, что $\forall x_i \exists y_k(t_j) \in \{y_j = F(x_i)\}$. Причем $y_k(t_j) \in [y_k^* - \Delta y, y_k^* + \Delta y]$, $k = [1, \dots, n]$, n – количество наблюдаемых параметров, $y_k^* \in Y^*$ – эталонное значение из технической документации, Δy – допуск измерений. Для некоторых параметров граница задается 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.

Схема организации испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы приведена на рис. 2. В процессе испытаний программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры выполняет преобразование сценариев испытаний в управляющие воздействия на объект контроля посредством контрольно-проверочной аппаратуры. Выполняется проверка и конструкционных деталей, и логики работы как самих устройств, так и комплексов, образующихся при взаимодействии объекта контроля со смежными системами и периферией. Такие испытания выполняются на основе интеллектуальной имитационной модели $S = \langle G, F, T \rangle$, которая имитирует поведение объекта контроля и сопряженных устройств. Описание модели и методов испытаний на ее основе приведено в [17].



Рис. 2. Схема организации испытаний

Fig. 2. Scheme of test organization

Структура объекта контроля G^o отображается в множество G , содержащее структурно-параметрическое представление модели S . В модели заданы методы функционирования F , которые позволяют на основе начальных данных X^0 и входных параметров X^i получать выходные результаты Y^m . Структура модели:

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

где $B = \cup B_i$ – множество элементов модели, представляющих свойства или функции отдельных устройств, $I = (\cup I_q^i)$ – множество коммутационных интерфейсов элементов – точек входов и выходов для B_i , $C = \cup C_{nl}^{ij}$ – множество коммутационных соединений между элементами модели, $C_{nm}^{ij} = \langle I_n^i, I_l^j \rangle$ – соединение элементов B_i и B_j по интерфейсам I_n^i и I_l^j , D – множество структур данных, $P = X \cup Y$ – множество входных параметров, команд управления и выходных параметров. Методы функционирования модели F объединяют логический и физический уровни моделирования:

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

где $R: A \rightarrow Z$ – множество правил базы знаний, $A = A_1 \& A_2 \& \dots \& A_r$ – логическое выражение, определяющее условие выполнения правила (антецедент), $Z = Z_1, Z_2, \dots, Z_v$ – действия, изменяющее состояние модели (консеквент), $Y = V(X)$ – множество виртуальных инструментов, представляющих собой программно-математические модели, построенные в среде технического моделирования.

Задача испытаний логики функционирования объекта контроля: результаты моделирования Y^m сравниваются с результатами испытаний Y^j и $Y^* = Y^m$. Проверяется выполнение условия: $\forall y_k(t_j) \in Y^j$, $y_k(t_j) \in [y_k^* - \Delta y, y_k^* + \Delta y]$, $d_k(t_j) \in [d_k^* - \Delta d, d_k^* + \Delta d]$, $y_k^*, d_k^* \in Y^*$. Анализ проводится не только на контролируемых параметрах, а на всех, получаемых в результате имитационного моделирования, что расширяет возможности испытаний. При испытаниях логики функционирования бортовых систем рассматриваются методы командно-программного управления бортовой аппаратурой. Структура испытательных процедур, предназначенных для анализа передачи и отработки команд приведена в синтаксической диаграмме на рис. 3. Узлы синтаксической диаграммы описывают элементы испыта-

тельной процедуры, линии – последовательность их определения, дуги – возможность повторения. Синтаксические диаграммы позволили создавать инструменты автоматизации и синтаксического контроля испытательных процедур.

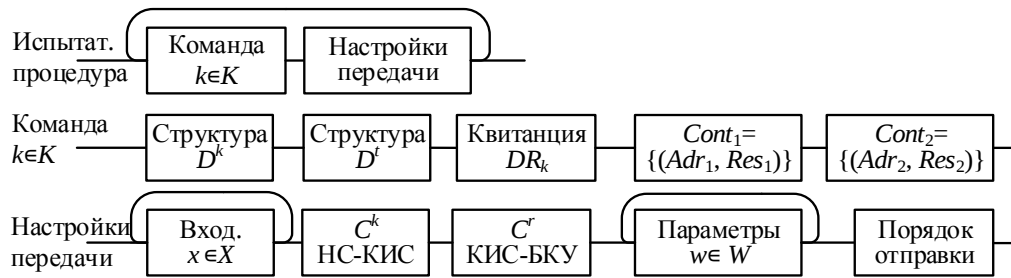


Рис. 3. Синтаксическая диаграмма структуры испытательных процедур

Fig. 3. Syntax diagram of the structure of test procedures

При создании испытательных процедур для каждой команды $k \in K$ задаются параметры, которые определяют поведение объекта контроля и имитаторов сопряженных систем в соответствии с выбранным вариантом командно-программного управления. Состав испытательных процедур: структура пакетов команд D^k , структура пакетов телеметрической информации D^t , ответы имитаторов бортовых систем DR_k , критерии контроля прохождения команд $Cont(k_i) = Cont_1(k_i) \cup Cont_2(k_i)$, настройки передачи – интерфейсы, по которым будут передаваться команды от имитатора наземного сегмента в командно-измерительную систему C^k и интерфейсы для взаимодействия КИС с имитаторами бортового комплекса управления C^r , порядок отправки команд (автоматически, циклически с заданным числом повторений, время ожидания реакции на команду T , количество попыток отправки). Анализ отработки команд выполняется по поступающей от объекта контроля телеметрической информации, для этого множество критериев $Cont(k)$ задается в виде пар (Adr, Res) , где Adr – адрес параметра в телеметрии, Res – значение для сравнения. Множество критериев разбито на два подмножества: $Cont_1(k)$ задает контроль квитанции по телеметрической информации, $Cont_2(k)$ – реакции на поступившую команду (изменение состояния бортовых систем после выполнения команды, например переключение активного комплекта оборудования).

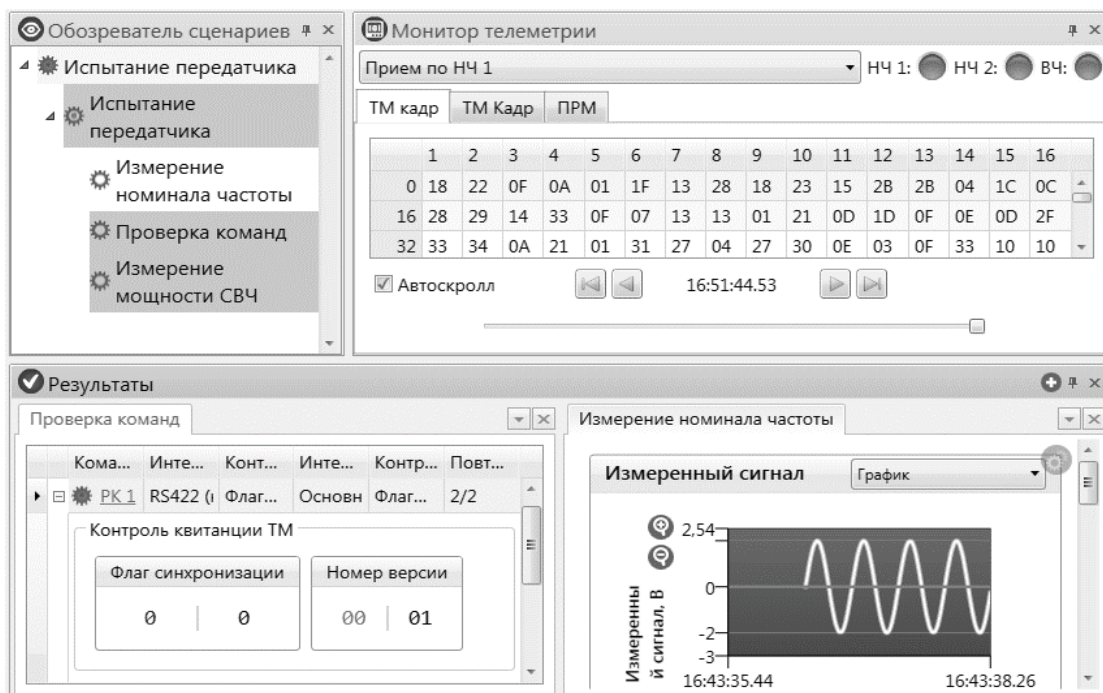


Рис. 4. Визуализация испытаний бортовых систем

Fig. 4. Visualization of tests of onboard systems

В процессе проведения испытаний выполняется настройка программных имитаторов и виртуальных приборов, входящих в состав программно-аппаратного комплекса контрольно-проверочной аппаратуры. Программное обеспечение взаимодействует с объектом контроля, передает команды и данные для телеметрии, выполняет анализ получаемых результатов испытаний в соответствии с алгоритмами работы оборудования. Ход проведения испытаний отображается в окнах мониторинга в графической и табличной форме и сохраняется в хранилище данных. На рис. 4 приведен пример визуализации испытаний.

Испытания проходят при непрерывном мониторинге данных и телеметрии, получаемых от оборудования. Выполняется визуализация, которая позволяет наблюдать за корректностью контрольных точек, выделять несовпадения или выходы за граничные значения. Выполняется сравнение результатов испытаний с прецедентами имитационного моделирования. Метод анализа результатов испытаний по прецедентам представлен в [18]. По данным, полученным в процессе испытаний, формируются технические отчеты.

Для анализа полноты методик испытаний предлагается автоматически формировать имитационную модель из построенных испытательных процедур и результатов испытаний объекта контроля и рассматривать логические цепочки построенной модели для анализа режимов работы бортовых систем.

2. Формирование правил базы знаний на основе программ испытаний

Для формирования базы знаний интеллектуальной имитационной модели предлагается на основе параметров, заданных в испытательных процедурах, определенных в них путей передачи данных, критериев контроля и результатов испытаний создавать правила $R: A \rightarrow Z$, где $A \subseteq \langle I, X, T \rangle$, $Z \subseteq \langle I, Y, T \rangle$. Алгоритм формирования правил для базы знаний имитационной модели приведен на рис. 4.

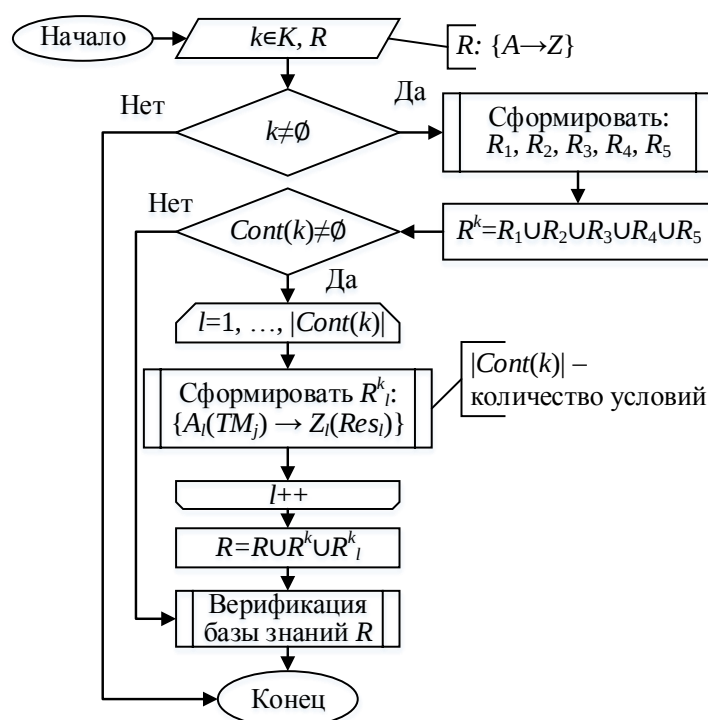


Рис. 5. Алгоритм формирования правил на основе испытаний

Fig. 5. Algorithm for forming rules based on tests

Для каждой команды $k \in K$, для которых определены испытательные процедуры строятся правила, описывающие функции бортовых систем при приёме и передаче команд, а также результаты их обработки. Состав правил и их семантическая интерпретация:

1) Правило передачи команды $R_1: A_1(k) \rightarrow Z_1(I_1, k, T)$, где $A_1 = \langle k \neq \emptyset \rangle$, $Z_1 = \langle \text{на интерфейс } I_1 \in C^k \text{ передать } k \text{ и установить } T = \langle \text{время ожидания} \rangle$, где I_1 – интерфейс, указанный в испытательной процедуре для передачи выбранной команды (интерфейсы могут быть различные, определяется возможностью тестируемого устройства), «время ожидания» задано в блоке «Порядок отправок».

2) Правило приема команды $R_2: A_{21}(I_2, x_1) \cup A_{22}(x_1) \rightarrow Z_2(k)$, где $A_2 = \langle \text{на интерфейс } I_2 \in C^k \text{ поступил массив байт } x_1 \rangle$, $A_{22} = \langle \text{структура } x_1 = D^k \rangle$, $Z_2 = \langle k = \text{массив байт } x_1 \rangle$, где I_2 – интерфейс, указанный в испытательной процедуре в качестве принимающего для объекта контроля, D^k – структура пакетов команд (формируются при описании испытательных процедур, различаются для разных устройств).

3) Правило передачи команд в бортовой комплекс управления $R_3: A_3(k) \rightarrow Z_3(I_3, k)$, где $A_3 = \langle \text{Тип } k \rangle$, $Z_3 = \langle \text{на интерфейс } I_3 \in C^r \text{ передать } k \rangle$, где тип k возвращает тип команды РК_{КИС} или РК_{БКУ}, по которому определяется обрабатывающее устройство.

4) Правило квитирования команды $R_4: A_{41}(I_3, x_2) \cup A_{42}(k) \rightarrow Z_4(I_4, k)$, где $A_{41} = \langle \text{на интерфейс } I_3 \in C^r \text{ поступил массив байт } x_2 \rangle$, $A_{42} = \langle \text{структура массива } x_2 = D^k \rangle$, $Z_4 = \langle \text{на интерфейс } I_4 \in C^r \text{ передать данные } DR_k \rangle$, где C^r – интерфейсы обмена данными между бортовыми системами.

5) Правило передачи телеметрии $R_5: A_{51}(I_5, x_3) \cup A_{52}(x_3) \rightarrow Z_5(I_5, TM_j)$, где $A_4 = \langle \text{на интерфейс } I_5 \in C^t \text{ поступил массив байт } x_3 \rangle$, $A_{52} = \langle \text{структура массива } x_3 = D^t \rangle$, $Z_5 = \langle TM_j = x_3 \rangle$, $TM_j \in TM$ – телеметрия, j – номер параметра в телеметрическом кадре.

6) Множество правил отработки команд и контроля по телеметрии: $R_l^k: A_l(TM_j) \rightarrow Z_l(Res_l)$ ($l = 1, \dots, |Cont(k)|$), где $|Cont(k)|$ – количество условий для контроля отработки команды k , заданных в испытательных процедурах, j – номер параметра в телеметрическом кадре, $A_l(TM_j) = \langle \text{параметр } TM_j \text{ по адресу } Adr_l = Res_l \rangle$, $Z_l = \langle \text{контроль } TM_j \rangle$.

База знаний дополняется построенными правилами. Сложность метода линейно зависит от числа критериев анализа отработки команд $Cont(k)$, заданных в испытательных процедурах: $C = \sum_{i=1}^K (|Cont(k_i)| + |R^k|)$.

Построенная база знаний отражает особенности функционирования испытываемого оборудования, пример визуализации имитационных экспериментов [19] приведен на рис. 5.

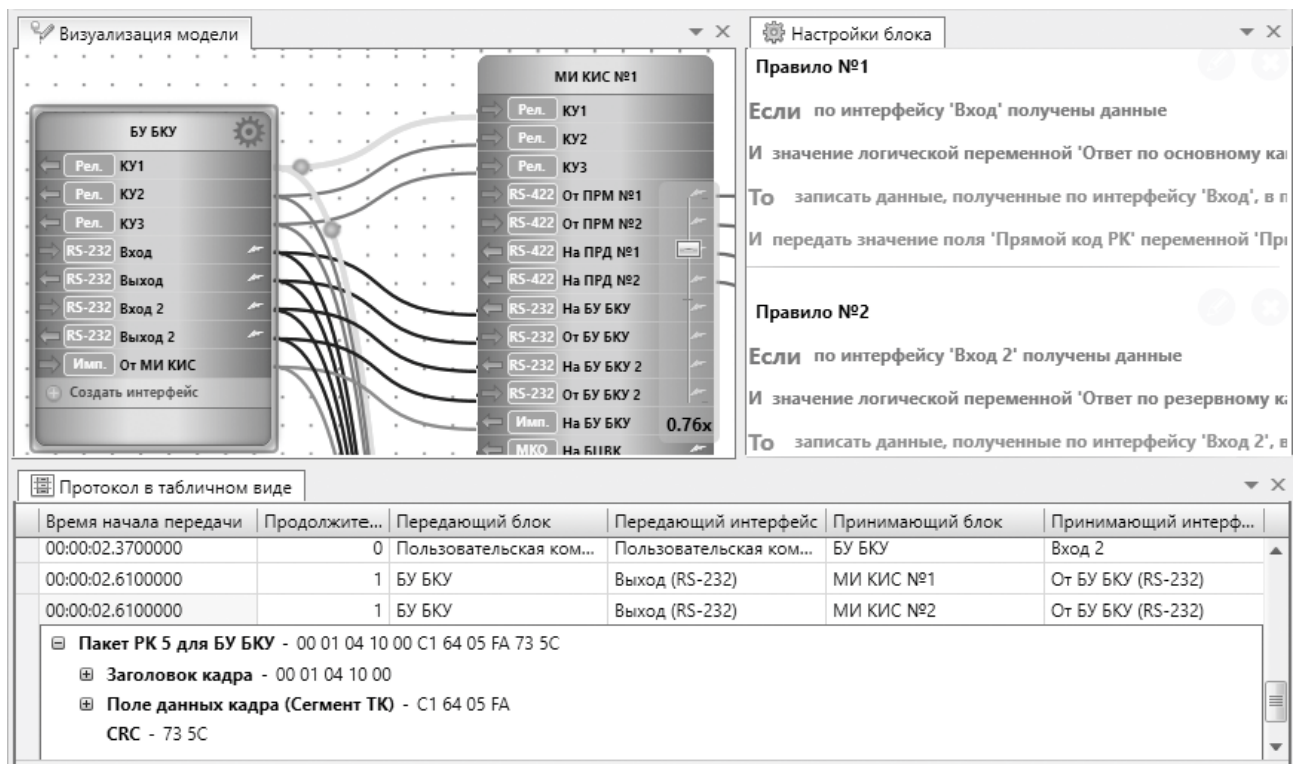


Рис. 6. Визуализация графической структуры и базы знаний модели
Fig. 6. Visualization of the model's graphical structure and knowledge base

Авторами предложены критерии анализа и верификации структуры и свойств базы знаний, разработаны визуальные компоненты интерактивной инфографики, выполняющие интерпретацию формального описания модели в интерактивные графические образы для графического исследования базы знаний [20]. Помимо автоматического контроля инструменты могут быть использованы для ручной проверки непротиворечивости знаний, а также соответствия моделей техническим описаниям, заданным в конструкторской документации.

Применение инфографических инструментов для исследования построенной по программам испытаний базы знаний обеспечит анализ процессов, происходящих при испытаниях объекта контроля и позволит делать выводы о полноте состава испытательных процедур.

3. Анализ программ испытаний по базе знаний интеллектуальной модели

Для анализа полноты применяемых программ испытаний объекта контроля предлагается выполнять сравнение базы знаний, построенной на основе испытательных процедур, с эталонной базой знаний, созданной при проектировании бортовых систем и отражающей поведение устройств, заложенное в технической документации. Введены формальные операции, позволяющие автоматизировать сопоставление методов функционирования моделей в базах знаний и строить инфографические представления цепочек логического вывода на графовых структурах.

Проекция $Pr(Q, M^i) = M_i$ – i -я компонента кортежа $\langle M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_p \rangle$, где $M_1 \subseteq M^1$, $M_2 \subseteq M^2$, ..., $M_i \subseteq M^i$, ..., $M_p \subseteq M^p$. Например, для того чтобы выбрать все команды, для которых есть правила их приема, нужно выполнить проекцию антецедентов правил $A = \langle I^A, X^A, K^A, T^A \rangle$ на множество команд K : $Pr(A_k, K) = \{k_i \in K^A\}$.

Выборка $Sel(Q, \theta)$ – множество элементов из Q , удовлетворяющих условию θ . Например, $Sel(R, K = k_i)$ задает множество правил, моделирующих функции отработки команды k_i . Заметим, что если $A^i \subseteq A$, то $Sel(A^i, \theta) \subseteq A^i \subseteq A$, т.е. 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 зависимости*, обозначим его – $Dep(Rch^i, Rch^j)$, если выполнение Rch^i влечет выполнение Rch^j (логический вывод). Отношение зависимости несимметрично, т.е. $Dep(Rch^i, Rch^j) \neq Dep(Rch^j, Rch^i)$.

Метод взаимодействия элементов модели B_i и B_j задается как $FMod(B_i, B_j) = Rch^i \cup Rch^j$, для которых выполняется $Dep(Rch^i, Rch^j)$. $FMod(B_1, \dots, B_p) = Rch^1 \cup Rch^2 \cup \dots \cup Rch^p$, 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 $B_1, \dots, B_p$.

Путь передачи данных между элементами B_i и B_j $L(B_i, B_j) = I_n^i \cup I_m^j$, где $I_n^i \in Pr(Rch^i, I)$, $I_m^j \in Pr(Rch^j, I)$, Rch^i – цепочка правил для B_i , Rch^j – для B_j , и выполняется $Dep(Rch^i, Rch^j)$.

Применяя введенную формализацию, предложен метод анализа базы знаний; обозначим построенную базу знаний R_N и эталонную базу знаний R_E .

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 $R_N' = Sel(R_N, k \in K_N)$, $R_E' = Sel(R_E, k \in K_E)$.

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, т.е. 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 которых $Dep(Rch_E^i, Rch_E^j)$.

5. Выполнить объединение зависимых цепочек правил по построенной и эталонной базам правил для всех элементов модели $B_1, \dots, B_p$, т.е. множество $FMod_N(B_1, \dots, B_p) = Rch_N^1 \cup \dots \cup Rch_N^p$ такое, 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. Найти пути $L_N(B_i, B_j)$ и $L_E(B_i, B_j)$ для всех $FMod_N(B_i, B_j) \neq \emptyset$ и $FMod_E(B_i, B_j) \neq \emptyset$.
7. Выполнить сопоставление полученных множеств, сформировать список ошибок.

Пример визуализации метода приведен на рис. 7, перечень выявленных в результате работы метода ошибок – на рис. 8.

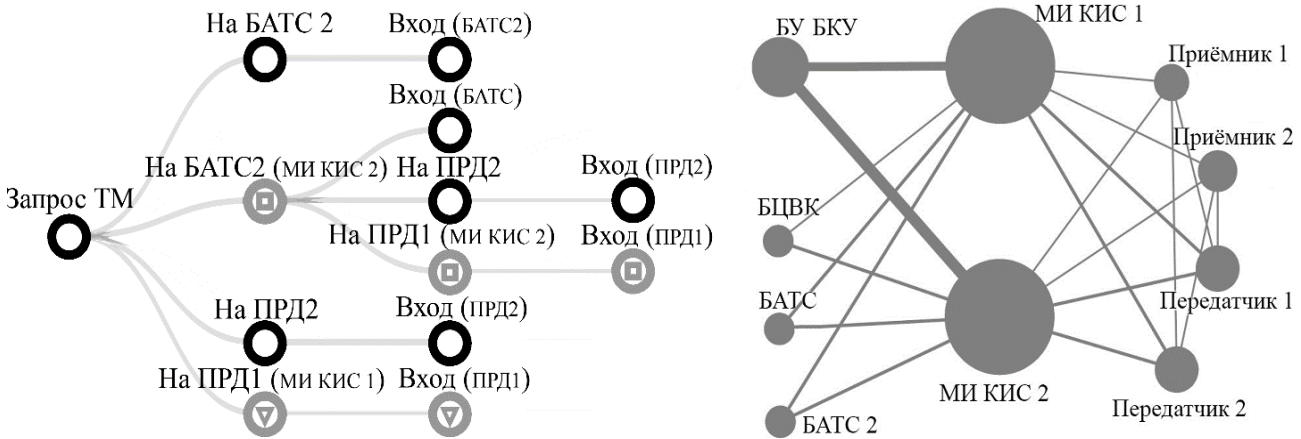


Рис. 7. Графическая визуализации результатов анализа программ испытаний
Fig. 7. Graphic visualization of test program analysis results

Графическая визуализация показывает совпадающие элементы в базах знаний – узлы обозначены пиктограммой , наличие правил в эталонной базе при отсутствии в базе, построенной по программам испытаний – , избыточные действия в методиках испытаний – . Результатом анализа является список ошибок, который отражает команды и методы испытаний, не соответствующие эталонной базе знаний.

Сравнение логических структур			
Цепочка 1 (Стартовый блок)		Цепочка 2 (Стартовый блок)	
МИ КИС 1 (Запрос ТМ)		МИ КИС 2 (Запрос ТМ)	
На БАТС2	Отсутствует правило передачи	На ПРД1	Отсутствует правило передачи
На ПРД1	Отсутствует правило передачи	Вход (ПРД1)	Отсутствует правило приёма
Вход (ПРД1)	Отсутствует правило приёма		

Рис. 8. Список ошибок базы знаний, построенной по программе испытаний
Fig. 8. Errors in the knowledge base built according to the test program

Помимо сравнения базы знаний, построенной из испытательных процедур с эталонной базой знаний, метод позволяет выполнять анализ полноты испытаний для однотипных устройств основного и резервного комплектов оборудования. В этом случае в качестве эталонной базы выбирается подмножество правил функционирования основного комплекта оборудования.

Разработаны инструменты мониторинга испытаний, результаты которых сохраняются в хранилище данных, выполняющие их автоматическое сопоставление с имитационными экспериментами в выбранных контрольных точках. Предложенная формализация позволила автоматизировать процесс анализа испытательных процедур и получаемых результатов испытаний для обеспечения полноты исследования не только физических характеристик устройств, но и логики их взаимодействия с бортовыми и наземными системами окружения.

Заключение

Предложен новый подход, обеспечивающий интеграцию методов построения и применения интеллектуальных имитационных моделей для поддержки испытаний бортовых систем. Исследуемые физические устройства представляются цифровыми образами в элементах интеллектуальной имитационной модели. Созданы интерактивные графические инструменты, позволяющие формировать правила работы модели на основе программ испытаний и выполнять анализ как построенных моделей относительно эталонных, отражающих проектные решения, так и результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования. Разработанные программные и технологические решения предоставляют конструкторам бортовой аппаратуры инструменты подготовки испытаний при различных вариантах использования и режимах функционирования бортовых систем, что упрощает подготовку испытательных процедур. Использование экспертных знаний, заложенных в имитационных моделях, предоставляет наглядные критерии оценки полноты и достоверности проводимых испытаний и способствует повышению их качества.

Созданные программные инструменты применяются для исследования командно-измерительных систем космических аппаратов в составе программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры. Программное обеспечение позволяет проводить автономные и комплексные испытания, рассматривать штатные и нештатные условия эксплуатации командно-измерительных систем, имитировать аварийные ситуации, отказы отдельных резервируемых устройств и каналов связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koo C. Development of simulation infrastructure compatible with ESA SMP for validation of flight software and verification of mission operation // Proc. of Simulation and EGSE for Space Programmes. 2012. P. 1–8.
2. Saleh J.H., Lamassoure E., Hastings D.E. Space systems flexibility provided by onorbit servicing // J. of Spacecraft and Rockets. 2002. V. 39 (4). P. 551–560.
3. Brouwer M., Casteleijn A., Schenau I., Oving B., Timmermans L., Zwartbol T. Developments in Test and Verification Equipment for Spacecraft. Noordwijk : National Aerospace Laboratory, 2000. 20 p.
4. Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Лохвицкий В.А. Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 3 (46). С. 49–64.
5. Тюгашев А.А. Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2 (14). С. 9–16.
6. Андреев А.М., Хацаюк В.О. Алгоритм оценивания пространственной доступности радиоизлучений космических аппаратов командно-ретрансляционных систем с использованием имитационного моделирования // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 650. С. 57–61.
7. Стратилатов Н.Р., Куренков В.И., Кучеров А.С., Якишик А.А. Методические основы разработки проблемно-ориентированной системы выбора основных проектных параметров космических аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15 (2). С. 68–79.
8. Горелов Ю.К., Киселёв С.К. Использование онтологического подхода при проектировании многофункционального авиационного индикатора // Онтология проектирования. 2018. Т. 8, № 3 (29). С. 400–411.
9. Real-Time Telemetry and Command Processing. URL: <https://www.kratosdefense.com/~media/kisi/pdf/epoch-tc-server-datasheet.pdf> (accessed: 03.09.2020).
10. Pereiral T.D., Ferreira M.G., Kucinski F.N. Using the PLUTO language on functional tests of a Brazilian Satellite's On-Board Data Handling Computer // Proc. SpaceOps Conference. Stockholm : Sweden, 2012. V. 1. P. 206–213.
11. Кудряшова Г.В. Применение программных имитаторов при наземной экспериментальной отработке бортовой аппаратуры космических аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. С. 627–628.
12. Миронов А.Н., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л. Прогнозирование качества функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов в условиях нечёткой информации о границах области работоспособных состояний // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. М. : Рос. науч.-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия, 2016. № 4 (32). С. 1–10.
13. Литвинов В.В., Марьянович Т.П. Методы построения имитационных систем. Киев : Наукова думка, 1991. 120 с.
14. Isaeva O.S. Technology of spacecraft onboard equipment design support // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1047. Art. 012115.
15. ГОСТ Р 53802–2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2011. 28 с.
16. Раннев Г.Г. Измерительные информационные системы. М. : Академия, 2010. 336 с.

17. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V. Command and Software Management Simulation for the Spacecraft Equipment Testing // 3rd Russian-Pacific Conf. on Computer Technology and Applications. 2018. P. 1–4.
18. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Koldyrev A.Yu. Creation of the base of a simulation model's precedents for analysis of the spacecraft onboard equipment testing results equipment // Advances in Intelligent Systems Research. 2018. V. 151. P. 78–81.
19. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Gruzenko E.A. Computer simulation of spacecraft onboard equipment // ACSR-Advances in Computer Science Research. 2015. № 18. P. 943–945.
20. Исаева О.С., Кулясов Н.В., Исаев С.В. Метод структурно-графического анализа и верификации интеллектуальной имитационной модели // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 50. С. 79–88.

Поступила в редакцию 9 апреля 2021 г.

Isaeva, O.S., Kulaysov, N.V., Isaev, S.V. (2021) INFOGRAPHIC METHOD TO SUPPORT TESTING OF SPACECRAFT ONBOARD SYSTEMS BASED ON KNOWLEDGE BASE. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 57. pp. 22–33

DOI: 10.17223/19988605/57/3

The paper proposes a method for testing the logic of functioning of spacecraft's onboard systems based on the intelligent simulation model knowledge base. The relevance of the study is due to modern approaches to digitalization of the production of onboard equipment. This requires the replacement of traditional design methods and iterative refinement of technical systems based on costly multiple tests on digital twins for analyzing critical states of products.

The authors have completed the formulation of the problem of testing the methods of command-telemetric interaction of spacecraft's onboard systems. The complexity of the tests is associated with the variability of communication protocols and data structures, as well as the need to ensure continuous monitoring of incoming telemetry information. The investigated physical devices are represented by digital images in the elements of the model. Such a model contains graphical structures and knowledge bases and describes the technical characteristics and rules for the operation of systems. The authors proposed methods for constructing models, automating the formation of test procedures, conducting tests of onboard equipment and analyzing their results according to the precedents of simulation. We have proposed a method for creating a knowledge base of a simulation model – digital twins from the constructed test procedures and test results of the controlled object. Our method made it possible to formulate the composition of the rules and introduce their semantic interpretation. The built knowledge base of the model simulates the functions of onboard systems when receiving and transmitting commands, as well as the results of their processing. To analyze the completeness of test programs, we introduced formal operations that allow automating the comparison of the functioning methods of the investigated and reference models. The investigated model is built on the basis of test procedures. The reference model was created in the design of onboard systems. It reflects the behavior of devices specified in the technical documentation.

Software tools have been created, which are included in the software of the control and testing equipment. The software allows conducting autonomous and complex tests. It simulates normal and abnormal operating conditions, emergency situations. It simulates failures of redundant devices and communication channels. New tools allow the designer of on-board equipment to evaluate the completeness of the test's programs with being carried out in the complex, as well as for individual implementations of the main and backup sets of onboard equipment. Expert knowledge in simulation models provides visual criteria for assessing the completeness and reliability of tests and contributes to improving the quality of decisions made by the designer at the stages of production of spacecraft's onboard systems.

Keywords: simulation modeling; intelligent model; knowledge base; infographics; onboard equipment; spacecraft; tests.

ISAEVA Olga Sergeevna (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation).

E-mail: isaeva@icm.krasn.ru

KULYASOV Nikita Vladimirovich (Engineer, Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation).

E-mail: razor@icm.krasn.ru

ISAEV Sergey Vladislavovich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director, Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation).

E-mail: si@icm.krasn.ru

REFERENCES

1. Koo, C. (2012) Development of simulation infrastructure compatible with ESA SMP for validation of flight software and verification of mission operation. *Proceedings of Simulation and EGSE for Space Programmes*. pp. 1–8.

2. Saleh, J.H., Lamassoure, E. & Hastings, D.E. (2002) Space systems flexibility provided by onorbit servicing. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 39(4). pp. 551–560.
3. Brouwer, M., Casteleijn, A., Schenau, I., Oving, B., Timmermans L. & Zwartbol T. (2000) *Developments in Test and Verification Equipment for Spacecraft*. Noordwijk: National Aerospace Laboratory.
4. Khomonenko, A.D., Starobinets, D.Yu. & Lokhvitskiy, V.A. (2016) A Model of Estimating Quickness of Functioning of Onboard Control Systems of Spacecraft Remote Sensing of the Earth. *Trudy SPIIRAN – Informatics and Automation (SPIIRAS Proceedings)*. 3(46). pp. 49–64. DOI: 10.15622/sp.46.5
5. Tyugashev, A.A. (2016) Podkhod k obespecheniyu otkazoustoychivosti kosmicheskikh apparatov na osnove avtomatizatsii proektirovaniya intellektual'nykh bortovykh programmnykh sredstv [An approach to ensuring fault tolerance of spacecraft based on design automation of intelligent onboard software]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*. 2(14). pp. 9–16.
6. Andreev, A.M. & Khatsyuk, V.O. (2016) Space availability of data relay system signals evaluation using the simulation modeling. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhayskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 650. pp. 57–61.
7. Stratilatov, N.R., Kurenkov, V.I., Kuchеров, A.S. & Yakishchik, A.A. (2016) Metodological basis of the development of a problem-oriented system for selecting design parameters of space vehicles. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie – Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 15(2). pp. 68–79.
8. Gorelov, Yu.K. & Kiselev, S.K. (2018) The use of ontology approach for aircraft display design. *Ontologiya proektirovaniya – Ontology of Designing*. 3(29). pp. 400–411. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-400-411
9. Kratosdefense.com. (n.d.) *Real-Time Telemetry and Command Processing*. [Online] Available from: <https://www.kratosdefense.com/~media/kisi/pdf/epoch-tc-server-datasheet.pdf> (Accessed: 3rd September 2020).
10. Pereiral, T.D., Ferreira, M.G. & Kucinski, F.N. (2012) Using the PLUTO language on functional tests of a Brazilian Satellite's OnBoard Data Handling Computer. *Proc. SpaceOps Conference*. Vol. 1. Stockholm: Sweden. pp. 206–213.
11. Kudryashova, G.V. (2016) Application of simulators software during spacecraft on board equipment ground experimental testing. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 1(12). pp. 627–628.
12. Mironov, A.N., Mironov, E.A. & Shestopalova, O.L. (2016) Functioning quality prediction of the spacecrafts onboard equipment in the conditions of fuzzy information on operability area boundaries. *Informatsionno-ekonomicheskie aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya – Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation*. 4(32). pp. 1–10.
13. Litvinov, V.V. & Maryanovich, T.P. (1991) *Metody postroeniya imitatsionnykh sistem* [Methods of constructing imitation systems]. Kyiv: Naukova Dumka.
14. Isaeva, O.S. (2021) Technology of spacecraft onboard equipment design support. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 1047. Art. 012115. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012115.
15. GOST R 53802–2010. (2011) *Sistemy i kompleksy kosmicheskie. Terminy i opredeleniya* [Space Systems and Complexes. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform.
16. Rannev, G.G. (2010) *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy* [Measuring Information Systems]. Moscow: Akademiya.
17. Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S. & Vogorovskiy, R.V. (2018) Command and Software Management Simulation for the Spacecraft Equipment Testing. *3rd Russian-Pacific Conf. on Computer Technology and Applications*. pp. 1–4. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482182
18. Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S. & Koldyrev, A.Yu. (2018) Creation of the base of a simulation model's precedents for analysis of the spacecraft onboard equipment testing results equipment. *Advances in Intelligent Systems Research*. 151. pp. 78–81. DOI: 10.2991/cmsa-18.2018.18
19. Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S. & Gruzenko, E.A. (2015) Computer simulation of spacecraft onboard equipment. *ACSR-Advances in Computer Science Research*. 18. pp. 943–945. DOI: 10.2991/cisia-15.2015.255
20. Isaeva, O.S., Kulaysov, N.V. & Isaev, S.V. (2020) Method of structural and graphical analysis and verification of intellectual simulation model. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 50. pp. 79–88. DOI: 10.17223/19988605/50/10