

УДК 004.94

DOI: 10.17223/19988605/50/10

О.С. Исаева, Н.В. Кулясов, С.В. Исаев**МЕТОД СТРУКТУРНО-ГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
И ВЕРИФИКАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 18-47-242007.

Представлен метод анализа интеллектуальной модели имитации функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Модель состоит из графической структуры, отражающей состав элементов бортовой аппаратуры, и базы знаний, описывающей методы ее работы. Выполнена формализация модели и предложены критерии анализа и верификации ее структуры и свойств. Разработаны визуальные компоненты интерактивной инфографики, выполняющие интерпретацию формального описания модели в интерактивные графические образы и формирующие перечень ошибок в функциональных зависимостях базы знаний.

Ключевые слова: имитационное моделирование; бортовая аппаратура космического аппарата; верификация; валидация; базы знаний; инфографика.

Конструирование современных космических аппаратов – это наукоемкий и дорогостоящий процесс, связанный с множеством разнообразных и нередко трудно формализуемых факторов, оказывающих влияние на результаты разработки. Компьютерное моделирование является основным научно обоснованным методом исследования характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах инженерной деятельности [1]. Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью имитационных моделей, выступающих в качестве инструмента экспериментатора взамен проведения дорогостоящих и трудоемких исследований реальных объектов [2]. Выбор метода моделирования и необходимая детализация моделей существенно зависят от этапа жизненного цикла сложной технической системы. Ранние этапы проектирования систем связаны с отсутствием достоверных данных о методах их функционирования. Применяемые в этом случае модели носят описательный характер и преследуют цель наиболее полно представить в компактной форме опыт и знания экспертов предметной области об объекте исследования. Имитационные системы, ориентированные на использование экспертных знаний при решении технологических и функциональных задач, называют интеллектуальными системами имитации [3].

Наиболее распространенный класс интеллектуальных систем, ориентированных на знания как способ тиражирования опыта высококвалифицированных специалистов, – это экспертные системы [4]. Применение экспертных систем способно обеспечить механизмы построения информационной памяти предприятия [5]. Экспертные системы позволяют описывать знания о динамическом поведении анализируемых объектов и используются на этапах построения концепции космической миссии, проектирования оборудования, проверки его работоспособности, а также в процессе эксплуатации для контроля и диагностики отказов [6].

В традиционных исследованиях контроль качества имитационных моделей основан на статистическом анализе и оценке ошибок моделирования, однако при отсутствии данных функциональных испытаний традиционный подход не может быть применен [7]. В этом случае используются методы, основанные на привлечении качественного опыта экспертов предметной области [8]. В работах [7–11] рассматриваются подходы к оценке качества имитационных моделей. В [7] предложен метод валидации, основанный на применении эмпирических данных и знаний, полученных из смежных областей. В [9] решается задача проверки непротиворечивости знаний на основе анализа матрицы инцидентности графа, построенной для обобщенных отношений следования между целевыми установ-

ками базы знаний. В [10] предложен интеллектуальный метод проверки модели, основанный на анализе сходства между временными рядами моделирования из компьютеризированной модели и наблюдаемыми временными рядами из реальной системы. В [11] верификация моделей обеспечивает контроль согласованности на уровне проверки ссылочной целостности между модулями, поиска циклических зависимостей и др.

В настоящей работе решается задача создания методологии структурно-графического анализа имитационной модели, которая может использоваться при моделировании функционирования бортовой аппаратуры космических систем [12–13]. В работе рассмотрены задачи оценки качества имитационных моделей, их структур, решение которых позволяет выполнять графическую интерактивную визуализацию таких свойств модели, как полнота, адекватность, непротиворечивость. Предлагаемые методы позволяют повысить качество моделей сложных систем.

1. Формальное описание модели

Интеллектуальная модель имитации функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата представляет собой набор множеств, описывающих состояние бортовых систем и их функционирование в каждый момент времени. Модель $S = \langle G, F, T \rangle$ [14], где G – структурно-параметрическое описание (множество элементов структуры), F – функциональное описание (множество методов функционирования), T – моменты времени наблюдения.

Структурно-параметрическое описание $G = \langle B, I, C, D, P \rangle$, где B – множество элементов модели (блоков), представляющих свойства или функции отдельных физических устройств, I – множество коммутационных интерфейсов, C – типизированные информационные зависимости, описывающие коммутационные соединения между блоками, D – множество структур данных, P – множество параметров. Множество $B = \{B_i\}$, где $B_i = \langle N_i, T_i, I_i, X_i, Y_i \rangle$, $i = [1, \dots, l]$, l – количество элементов модели, N_i – наименование i -го элемента, T_i – тип устройства, $I_i \subseteq I$ – подмножество коммутационных интерфейсов I , $X_i \subseteq X$, $Y_i \subseteq Y$ – подмножества параметров.

Коммутационные интерфейсы $I_i = \{I_i^1, \dots, I_i^n\}$, n – количество точек входов и выходов B_i . I_i^n имеет характеристики: тип интерфейса $Tr(I_i^n)$, направленность передачи $Rt(I_i^n)$ и признак состояния $Onf(I_i^n)$. 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, например задавать вероятности потери сигнала и ошибки передачи.

Множество коммутационных соединений $C_{ij} = \{C_{ij}^1, \dots, C_{ij}^{nm}\} \subseteq C$ определяет пути взаимодействия пары моделей B_i и B_j ($i, j = [1, \dots, l]$). $C_{ij}^{nm} = \langle I_i^n, I_j^m, \tau_{ij} \rangle$, где I_i^n – интерфейс B_i , I_j^m – интерфейс B_j , τ_{ij} – время прохождения сигнала между интерфейсами. Коммутационное соединение однозначно определяет два элемента модели, обозначим это как $C_{ij} \in B_i \times B_j$, если $\exists I_i^n \in C_{ij}, I_i^n \in C_{ij} \mid I_i^n \in B_i, I_i^n \in B_j$.

Функциональное описание модели представлено множеством $F = \{R(P, T)\}$, где R – множество правил функционирования. $R = \{A(I_i^n, X, K, T) \rightarrow Z(I_i^m, Y, K, T, D(K))\}$, где A – условия, при которых правило должно быть выполнено, Z – действия, вызываемые при выполнении правил. Условия и действия представляют собой выражения над параметрами, заданными в структурно-параметрическом описании, либо функции, осуществляющие изменение состояния модели. Условие A может инициироваться интерфейсом I_i^n элемента модели B_i , на который поступили данные X или команды K , или таймером, определяющим время T наступления события. В этом случае будем говорить, что $I_i^n \in A$, $X \in A$, $K \in A$, $T \in A$. Действие Z изменяет состояние модели: выполняет передачу данных на интерфейс I_i^m элемента модели B_j , изменяет множество выходных параметров Y , команд K , таймеров выполнения T или вызывает выполнение функций, определяемых командой K , таких как переключение на работу по основному или резервному каналу и пр. Для каждого элемента $B_i \in B$ всегда можно однозначно определить его параметры $P_i \in P$, интерфейсы $I_i \in I$ и правила $R_i = A_i \rightarrow Z_i$, т.е. можно говорить, что $\forall B_i \exists \{P_i\}, \{I_i\}, \{R_i\}$.

Мощностью множества будем называть количество различных элементов этого множества. Например, количество элементов модели для $B_i \in B$ обозначим как $|B|$. Цепочкой правил $R'(B_i) = \{R_i^1, \dots, R_i^q\} \subseteq R$ назовем взаимосвязанное подмножество правил, выполняемых в процессе логического вывода в блоке модели B_i . Обозначим $L(I_i^n, I_j^m) = R'(B_i) \cup R'(B_j)$ путь от B_i к B_j через интерфейсы $I_i^n \in B_i$ и $I_j^m \in B_j$, определяемый множеством правил $R'(B_i) \cup R'(B_j)$. I_i^n – начало пути, I_j^m – окончание. Длиной пути $L(I_i^n, I_j^m)$ назовем мощность множества правил $R'(B_i) \cup R'(B_j)$, обозначим $|L(I_i^n, I_j^m)|$.

Суть построения модели сводится к созданию упрощенной структуры, свойства и поведение которой соответствуют системе-оригиналу. В зависимости от степени агрегирования структуры модели и характера обобщения методов функционирования для одного и того же оригинала можно получить несколько различных реализаций моделей.

2. Пример построения модели

Бортовые системы 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 систем космического аппарата и др. Для построения модели применяются графические инструменты и редактор баз знаний. Они позволяют формировать структуру модели, задавать конфигурацию функциональных блоков и коммутационных связей и описывать логику ее работы в виде правил.

Рассмотрим пример построения имитационной модели. Пусть имеется два бортовых устройства, осуществляющих информационное взаимодействие – имитатор бортового комплекса управления (БКУ) и имитатор командно-измерительной системы (КИС), т.е. $B = \{B_1, B_2\} = \{\text{«Имитатор БКУ»}, \text{«Имитатор КИС»}\}$. 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.

Множество коммутационных интерфейсов первого устройства $I_1 = \{I_1^1, I_1^2, I_1^3\}$, $Tr(I_1^1) = \text{«Рел»}$ (релейный интерфейс), $Tr(I_1^2) = \text{«RS-232»}$ (recommended standard 232), $Tr(I_1^3) = \text{«RS-422»}$ (recommended standard 422). $Rt(I_1^1) = \text{«Исх»}$, $Rt(I_1^2) = \text{«Вх»}$, $Rt(I_1^3) = \text{«Исх»}$ («Вх» – интерфейс приёма данных, «Исх» – интерфейс передачи данных). Множество коммутационных интерфейсов второго устройства $I_2 = \{I_2^1, I_2^2, I_2^3, I_2^4\}$, $Tr(I_2^1) = \text{«Рел»}$, $Tr(I_2^2) = \text{«RS-232»}$, $Tr(I_2^3) = \text{«RS-422»}$, $Tr(I_2^4) = \text{«ВЧ»}$ (высокочастотный интерфейс), $Rt(I_2^1) = \text{«Вх»}$, $Rt(I_2^2) = \text{«Исх»}$, $Rt(I_2^3) = \text{«Вх»}$, $Rt(I_2^4) = \text{«Исх»}$. В модели определены коммутационные соединения: $C_{12}^{11} = \langle I_1^1, I_2^1 \rangle$, $C_{12}^{22} = \langle I_1^2, I_2^2 \rangle$, $C_{12}^{34} = \langle I_1^3, I_2^3 \rangle$. Графическая структура описанной модели показана на рис. 1.

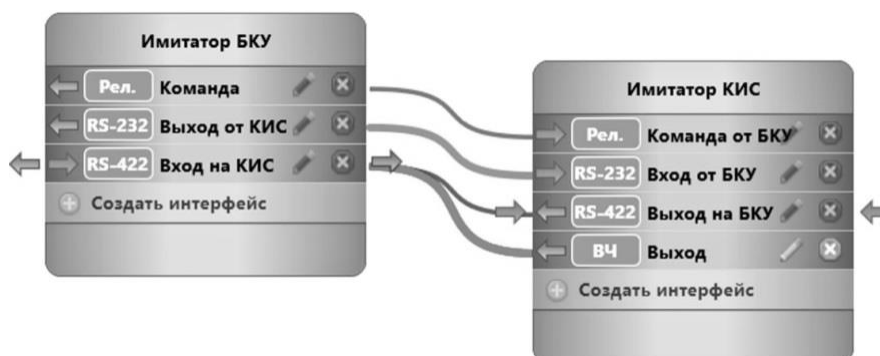


Рис. 1. Графическое представление модели
Fig. 1. Graphical presentation of a model

Определим методы функционирования имитационной модели. В функциональном представлении R создадим правило $A_1 \rightarrow Z_1$, которое описывает следующие действия: устройство B_2 получает от B_1 данные на интерфейс I_2^2 и часть принятого пакета длиной в два байта возвращает в B_1 по интер-

фейсу I_2^3 . Подобным образом задается взаимодействие между блоками модели и по другим коммутационным интерфейсам. В базе знаний правила описываются в виде конструкций: «Если А то В», текстовый вид правила показан на рис. 2.

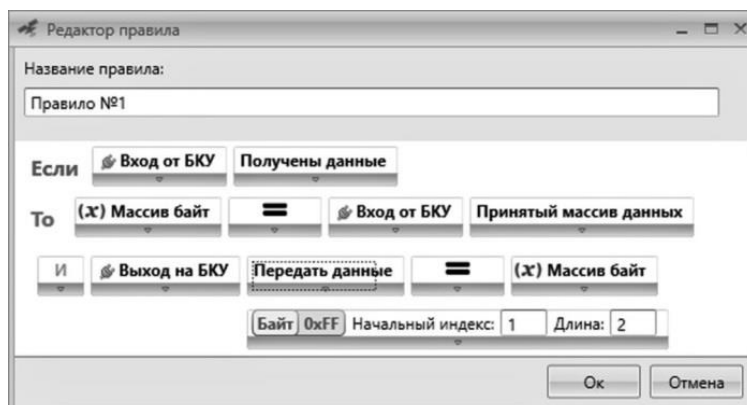


Рис. 2. Редактор базы знаний
Fig. 2. Knowledge base editor

Имитационная модель может содержать десятки функциональных блоков, имитирующих бортовые системы, и описывать методы их взаимодействия между собой и с наземным комплексом управления. После построения модели требуется провести анализ ее соответствия целям и задачам моделирования.

3. Метод структурно-графического анализа модели

Методы оценки модели в общем случае сводятся к получению информации о том, насколько хорошо модель описывает реальные процессы, происходящие в исходном объекте, и насколько качественно она будет имитировать развитие данных процессов [15]. Критерии оценки включают в себя такие аспекты существования модели, как адекватность, непротиворечивость, полнота и др. Для имитационных моделей, в основе которых лежит база знаний, такие критерии носят эмпирический характер.

Авторами данной работы предложен метод оценки соответствия имитационной модели и базы знаний предметной области в объеме, отвечающем целям моделирования. Метод имеет человеко-машинную реализацию. Программное обеспечение автоматически выполняет контроль структуры модели и синтаксиса базы знаний, автоматически строит графические представления, описывающие основные элементы модели и их связи в виде интерактивных образов инфографики, формирует списки ошибок, выявленные при анализе, и текстовые рекомендации для их устранения. Метод включает анализ таких характеристик, как валидация модели и данных, верификация и полнота модели.

Валидация модели – соответствие между поведением модели и исследуемого реального объекта. Для интеллектуальных систем имитации валидация заключается в оценке логической непротиворечивости знаний. Для валидации модели требуется произвести следующие действия:

1. Выполнить поиск правил, которые при одинаковых условиях содержат разные действия при применении правил. Если такие правила найдены, то база знаний противоречива.
2. Выбрать правила, для которых в условии содержатся команды (из базы команд). Если существуют такие команды, для которых есть несколько правил, действия которых задают переходы к разным элементам модели, то база знаний содержит ошибки.
3. Для выбранных в п. 2 правил построить зависимые цепочки, просмотрев все переходы между правилами. Если существуют такие команды, для которых построены различные последовательности действий, то такие цепочки являются ошибочными.
4. Сформировать перечень найденных ошибок с указанием элементов модели, команд и правил базы знаний.

Валидация данных заключается в анализе реакций модели на изменения входных параметров. Валидация проводится с помощью имитационных экспериментов при штатных значениях переменных X и значениях на границе их области определения. Автоматическая валидация предполагает, что для всех данных, передаваемых по интерфейсам модели, есть методы их получения и обработки. Для валидации данных требуется выполнить следующие действия:

1. Выполнить поиск элементов модели, для которых в базе знаний не содержится правил для получения или передачи данных по коммутационным соединениям, в зависимости от типа интерфейса (вх., исх.).
2. Найти все коммутационные соединения элементов модели. Выбрать не связанные правилами соединения.
3. Выполнить поиск команд из базы команд, для которых нет правил их приема / обработки / передачи.
4. Сформировать перечень найденных ошибок с указанием элементов модели, коммутационных соединений или команд.

Верификация модели предполагает проверку на соответствие модели замыслу исследователя на уровне структуры и методов. Для верификации модели метод структурно-графического анализа выполняет следующие действия:

1. Выбрать соединения элементов модели, у которых типы коммутационных интерфейсов не совпадают.
2. Выбрать соединения элементов модели, у которых одинаковые направления передачи данных (вх., исх.).
3. Выполнить поиск элементов модели, для которых не заданы правила в базе знаний.
4. Выполнить поиск коммутационных соединений, которые не заданы в правилах (в части «условия» или «действия»).
5. Сформировать перечень найденных ошибок с указанием элементов модели, коммутационных соединений или интерфейсов.

Пункты 1, 2 позволяют выявлять ошибки структуры, 3, 4 – наличие методов функционирования для всех элементов модели.

Полнота модели – проверка всех возможных вариантов развития моделируемых процессов. Для интеллектуальных систем имитации полнота недостижима, метод структурно-графического анализа определяет характеристики модели, на основе которых конструктор может судить о допустимой степени детализации модели при ее декомпозиции. В данном случае метод может построить рекомендации, на основании которых конструктор сам принимает решение об изменении модели. Для формирования рекомендаций выполняются следующие действия:

1. Выполнить расчет функциональной нагрузки на элементы модели, коммутационные интерфейсы и соединения элементов. Выбрать элементы с наибольшей нагрузкой. Сформировать рекомендации о резервировании устройств и линий связи.
2. Построить все пути передачи данных между элементами модели с указанием интерфейсов, по которым происходит взаимодействие. Выбрать «несвязные» пути, «замыкания» и «тупики». Сформировать рекомендации о проверке корректности коммутации устройств.
3. Выбрать альтернативные пути передачи данных. При их отсутствии сформировать рекомендации о резервировании путей передачи данных.
4. Сформировать перечень рекомендаций с указанием элементов модели, коммутационных соединений или интерфейсов.

4. Реализация метода анализа имитационной модели

Реализация метода структурно-графического анализа выполнена на основе библиотек интерактивной инфографики `d3.js` и `sigma.js` [16]. Для верификации модели строится таблица ошибок, которая содержит перечень элементов модели, интерфейсов и описание найденных при анализе ошибок. Фрагмент таблицы приведен на рис. 3.

Таблица ошибок

Передающий блок		Принимающий блок		Описание ошибки
МИ КИС	На ПРД (RS-422)	Передатчик	Выход (ВЧ)	Соединены интерфейсы различного типа
МИ КИС	От БАТС (RS-232)	Передатчик	Команда (RS-232)	Соединенные интерфейсы не синхронизированы по направлению передачи

Рис. 3. Фрагмент таблицы ошибок структуры модели

Fig. 3. Model's structure error table

Для анализа функциональных связей, заданных в базе знаний применяется круговая диаграмма зависимостей (dependency wheel). Секции диаграммы обозначают элементы модели, например имитаторы бортовых устройств, а лучи между ними отображают взаимодействия, заданные в базе знаний. Диаграмма позволяет интерактивно выбирать зависимости отдельных элементов модели, определять ошибки базы знаний, выявлять недостающие или избыточные данные и структуры, для которых не заданы правила в базе знаний, обеспечивая контроль полноты функционального представления. Пример диаграммы зависимостей представлен на рис. 4.

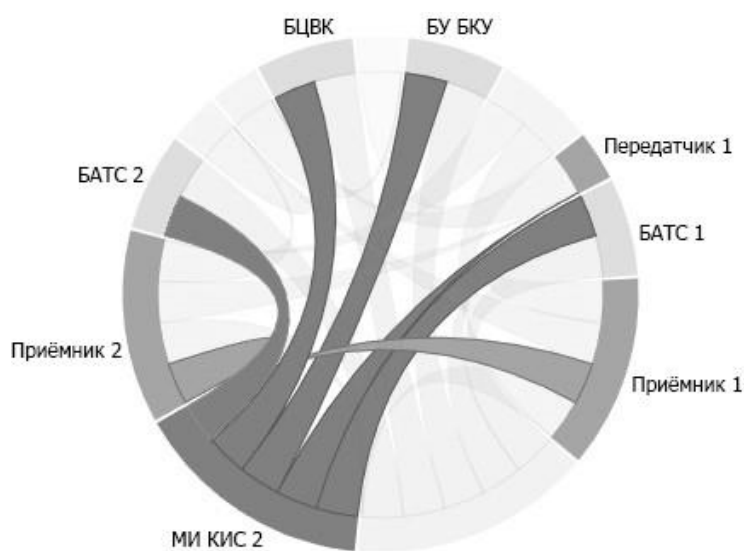


Рис. 4. Круговая диаграмма зависимостей между элементами модели

Fig. 4. Dependency circle chart of interaction between model's elements

Для исключения ошибок структуры, при коммутации элементов модели применяется графическое представление, отображающее связи между интерфейсами, показанное на рис. 5 (фрагмент диаграммы). На основе исследования диаграмм делается вывод о соответствии структуры модели и базы знаний.

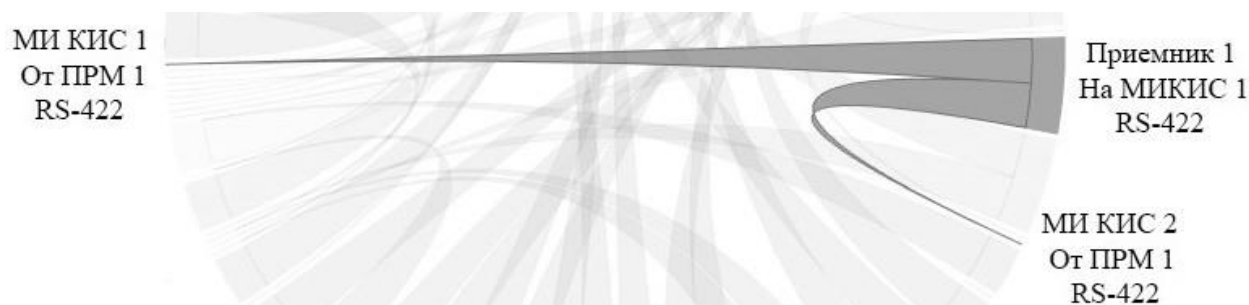


Рис. 5. Отображение связей между интерфейсами имитационной модели

Fig. 5. Links between interfaces of a simulation model

На основе проведенного анализа программное обеспечение формирует перечень ошибок в функциональных зависимостях. Фрагмент таблицы ошибок показан на рис. 6.

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.	
МИ КИС 1	От БАТС 2	БАТС 2	Выход
		Для принимающего интерфейса описано правил передачи.	

Рис. 6. Фрагмент таблицы ошибок функциональных зависимостей
Fig. 6. Functional dependency error table

Таблица ошибок содержит наименования элементов модели, команд, перечень правил базы знаний и текстовое описание найденных при анализе проблем.

Исследование коммуникационной нагрузки модели выполняется на специальном графе, узлы которого представляют элементы модели, дуги – пути их взаимодействия с другими подмоделями. Пример графа показан на рис. 7. Размер узлов и ширина дуг отображают степень нагрузки, вычисляемую как мощность множества правил для элементов модели. Высокая загруженность элементов модели может послужить поводом к ее пересмотру или дополнительному резервированию оборудования и коммутации.

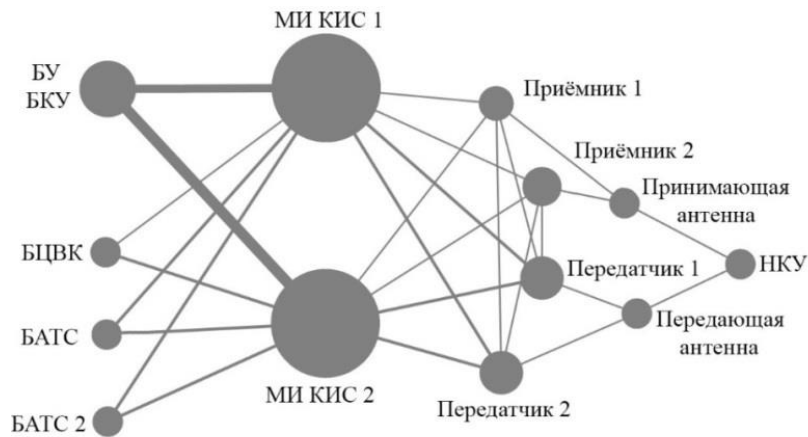


Рис. 7. Граф нагрузки на элементы модели
Fig. 7. Model's workload graph

Взаимодействие между правилами базы знаний, описывающими обработку данных на отдельных интерфейсах модели, отображается на графе покрытия (рис. 8). Изменение масштаба отображения графа позволяет рассматривать модель в целом, детализировать отдельные элементы модели или все коммутационные соединения, описанные в базе знаний, с указанием начальных и конечных интерфейсов. Интерактивные графические элементы позволяют визуализировать показатели покрытия структуры модели правилами базы знаний. Выделяются элементы модели, в составе которых все интерфейсы описаны логическими правилами либо отдельные узлы не имеют правил. Это свидетельствует о наличии коммутационных соединений, по которым не предусмотрена передача данных, что является ошибкой проектирования модели. Фрагмент графа, представленный на рис. 8, демонстрирует связи между интерфейсами блоков и позволяет детализировать покрытие правилами по каждому из интерфейсов.

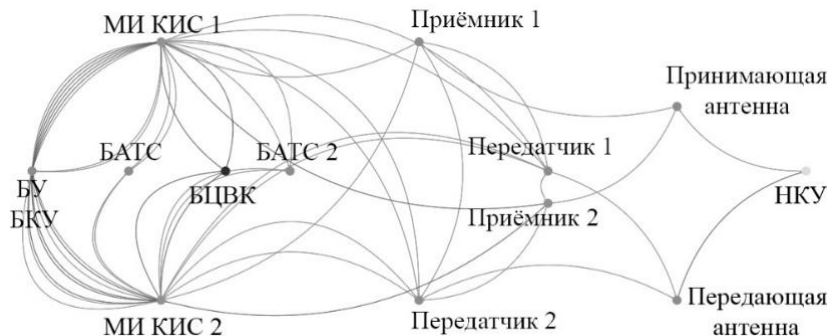


Рис. 8. Граф покрытия правилами
Fig. 8. Coverage graph

На основе построенных графов программное обеспечение формирует таблицу предупреждений о превышении средней нагрузки на элементы модели. Фрагмент таблицы показан на рис. 9.

Таблица предупреждений

Тип	Имя	Больше ср.	Рекомендации
Блок	МИ КИС 2	383%	Рекомендованно резервирование устройства.
Блок	МИ КИС 1	381%	Рекомендованно резервирование устройства.
Интерфейс	На БУ БКУ (МИ КИС 2)	700%	Рекомендованно резервирование интерфейса.
Интерфейс	Команда (Передатчик 2)	300%	Рекомендованно резервирование интерфейса.
Соединение	МИ КИС 2 - БУ БКУ	100%	Рекомендованно резервирование соединения.
Соединение	БУ БКУ - МИ КИС 1	100%	Рекомендованно резервирование соединения.

Рис. 9. Фрагмент таблицы предупреждений превышения средней нагрузки
Fig. 9. Overload warning table

В таблице 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.

Графическая визуализация модели, а также формируемые перечни ошибок и предупреждений позволяют конструктору бортовой аппаратуры выполнять анализ характеристик базы знаний.

Заключение

В работе предложен человеко-машинный метод анализа структуры и свойств имитационной модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Программное обеспечение строит наглядные диаграммы, отражающие свойства и взаимосвязи элементов модели, формирует перечни ошибок и рекомендаций, на основании которых конструктор может принимать решение о внесении изменений в модель. Реализованный метод позволяет выявлять зависимости отдельных элементов модели, ошибки базы знаний, недостающие или избыточные данные и структуры, для которых не заданы правила в базе знаний, обеспечивая контроль полноты функционального представления. Помимо автоматического формирования списка ошибок модели, метод может использоваться для ручной проверки соответствия моделей техническим описаниям, заданным в конструкторской документации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов К.А., Гончарова Н.В. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 104 с.

2. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М. : Высш. шк., 2009. 343 с.
3. Литвинов В.В., Марьянович Т.П. Методы построения имитационных систем. Киев : Наукова думка, 1991. 120 с.
4. Остроух А.В. Интеллектуальные системы. Красноярск : Науч.-инновационный центр, 2015. 110 с.
5. Tan C.F., Wahidin L.S., Khalil S.N., Tamaldin N. The application of expert system: a review of research find applications // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. No. 11 (4). P. 2448–2453.
6. Eickhoff J. Simulating Spacecraft System. Springer, 2009. 376 p.
7. Лычкина Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов / под ред. В.В. Година. М. : Академия ИТ, 2005. 165 с.
8. Min F., Yang M., Wang Z. Knowledge-based method for the validation of complex simulation models // Simulation Modelling Practice and Theory. 2010. No. 18 (5). P. 500–515.
9. Василенко Д.Е., Обидин Д.Н., Бердник П.Г. Разработка процедуры контроля непротиворечивости знаний для открытой экспертной системы реального времени // Системы обработки информации. 2016. № 9 (146). С. 90–93.
10. Yuchen Zhou, Ke Fang, Ming Yang, Ping Ma. An intelligent model validation method based on ECOC SVM // Proc. of the 10th Int. Conference on Computer Modeling and Simulation. 2018. P. 67–71.
11. Zanon O. The SimTG simulation modeling framework a domain specific language for space simulation // Proc. of the 2011 Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium. 2011. P. 16–23.
12. Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Евсюков А.А. Инструменты компьютерного моделирования функционирования бортовой аппаратуры космических систем // Тр. СПИИРАН. 2018. № 56. С. 144–168. DOI: 10.15622/sp.56.7.
13. Исаева О.С. Разработка методики автоматизации испытаний на основе имитационной модели функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 10 (172). С. 30–38.
14. Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Грузенко Е. А. Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии. 2015. № 20 (3). С. 33–44.
15. Антонов А.В. Системный анализ : учебник для вузов. 3-е изд. М. : Высш. шк., 2008. 454 с.
16. Bostock M. Data-Driven Documents. URL: <https://d3js.org/> (accessed: 28.04.2019).

Поступила в редакцию 16 мая 2019 г.

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'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 50. pp. 79–88

DOI: 10.17223/19988605/50/10

The paper presents a method for analyzing an intelligent model of simulating the functioning of the spacecraft's onboard equipment. The model consists of a graphic structure that presents the elements of onboard equipment and a knowledgebase that describes the methods of its operation. The authors formalized the model and proposed criteria for the analysis and verification of its structure and properties. We have developed visual components of interactive infographics that performing interpretation of the formal description of the model in interactive graphic images for analysis and detect errors of the knowledgebase. In addition to automatic control, interactive graphic tools can be used to manually check the completeness and consistency of knowledge, as well as the compliance of models with the technical descriptions given in the design documentation.

Intelligent simulation model consists of a graphical structure duplicating the composition of the elements of the onboard equipment and a knowledge base describing the methods of its operation. Model $S = \langle G, F, T \rangle$, where G is a structural-parametric description (a set of structure elements), F is a functional description (a set of functioning methods), T is the time of observation. A structural-parametric description of $G = \langle B, I, C, D, P \rangle$, where B is a set of elements representing properties or functions of physical devices, I is a set of commutation interfaces, C is typed information dependencies describing connections between elements from B , D is a set of data structures, P is a set of parameters. Functional description $F = \{R(P, T)\}$, where R is the set of rules of the knowledge base. $R = \{A \rightarrow Z\}$, where A is the conditions for rule's fulfillment and Z is the actions required for changing the model's state.

The method allows to interactively to build graphs of dependencies of different elements of the model, detect errors of the knowledge base, reveal lacking or excessive data and structures that do not have rules set in the knowledge base and provide control of completeness of functional presentation. For example, the completeness property of a model: $\forall B_i \in B |R(B_i)| \neq 0$, where $|R(B_i)|$ is the number of rules for element of the model B_i , is visualized on the workload graph. The size of nodes and arcs of the graph show the intensity of load calculated as the number of rules for the model's elements. High workload of the elements may be a reason for revision of the model or for additional reservation of equipment and commutation.

Keywords: simulation modeling; spacecraft onboard equipment; verification; validation; knowledge base; inforgafika.

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, Assistant 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. Aksenov, K.A. & Goncharova, N.V. (2015) *Modelirovanie i prinyatie resheniy v organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh* [Modeling and decision making in organizational and technical systems]. Ekaterinburg: Ural State University.
2. Sovetov, B.Ya. & Yakovlev, S.A. (2009) *Modelirovanie sistem* [System modeling]. Moscow: Vysshaya shkola.
3. Litvinov, B.V. & Maryanovich, T.P. (1991) *Metody postroeniya imitatsionnykh sistem* [Methods for constructing simulation systems]. Kiev: Naukova dumka.
4. Ostroukh, A.V. (2015) *Intellektual'nye sistemy* [Intellectual systems]. Krasnoyarsk: Nauch.-innovatsionnyy tsentr.
5. Tan, C.F., Wahidin, L.S., Khalil, S.N. & Tamaldin, N. (2016) The application of expert system: a review of research and applications. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 11(4). pp. 2448–2453.
6. Eickhoff, J. (2009) *Simulating Spacecraft System*. Springer.
7. Lychkina, N.N. (2005) *Imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov* [Simulation modeling of economic processes]. Moscow: IT Academy.
8. Min, F., Yang, M. & Wang, Z. (2010) Knowledge-based method for the validation of complex simulation models. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 18(5) pp. 500–515. DOI: 10.1016/j.simpat.2009.12.006
9. Vasilenko, D.E., Obidin, D.N. & Berdnik, P.G. (2016) Establishing procedures for the contradiction control for open knowledge of expert system real time. *Sistemi obrabki informatsii – Information Processing Systems*. 9(146). pp. 90–93.
10. Zhou, Y, Fang K., Yang, M. & Ma, P. (2018) An intelligent model validation method based on ECOC SVM. *Proc. of the 10th Int. Conference on Computer Modeling and Simulation*. Sydney, Australia. pp. 67–71.
11. Zanon, O. (2011) The SimTG simulation modeling framework a domain specific language for space simulation. *Proc. of the 2011 Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium*. pp. 16–23.
12. Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S. & Evsyukov, A.A. (2018) Tools of computer modeling of the space systems' onboard equipment function. *Tr. SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 56. pp. 144–168. DOI: 10.15622/sp.56.7.
13. Isaeva, O.S. (2018) Development of a method for automation of testing based on the simulation model of functioning of the onboard equipment of the spacecraft. *Herald of Computer and Information Technologies*. 10(172). pp. 30–38.
14. Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S. & Gruzenko, E.A. (2015). The method for system modelling of the spacecraft on-board equipment. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*. 20(3). pp. 33–44.
15. Antonov, A.V. (2008) *Sistemnyy analiz* [System Analysis]. Moscow: Vysshaya shkola.
16. Bostock, M. (n.d.) *Data-Driven Documents*. [Online] Available from: <https://d3js.org/>. (Accessed: 28th April 2019).