

Л.Ф. НОЖЕНКОВА, О.С. ИСАЕВА, А.А. ЕВСЮКОВ
**ИНСТРУМЕНТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Евсюков А.А. **Инструменты компьютерного моделирования функционирования бортовой аппаратуры космических систем.**

Аннотация. В статье описан инструментальный программный комплекс, позволяющий строить, выполнять и интегрировать имитационные модели функционирования бортовой аппаратуры космических систем. В основу положена технология повторного использования, определенная в международном стандарте Simulation Model Portability (SMP2). Наряду с реализацией стандартных правил построения интегрируемых моделей разработаны дополнительные оригинальные средства информационно-графического и интеллектуального моделирования. Таким образом, обеспечиваются возможности графически строить модели архитектуры бортовых систем, задавать методы функционирования моделей и определять варианты выполнения команд управления бортовой аппаратурой.

Работы ведутся в рамках создания программного обеспечения проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования в космической отрасли. Разработанный программный комплекс позволит конструкторам не только строить собственные модели бортовых систем, но и объединять имитаторы устройств различных производителей, проводить имитационные эксперименты для подготовки и анализа технических проектов. Предложенный подход обеспечивает экономические и технологические преимущества для развития наукоемкого производства космической техники.

Ключевые слова: инфраструктура имитационного моделирования, simulation model portability standard, космический аппарат, бортовая аппаратура, командно-измерительная система.

1. Введение. Неотъемлемой частью научно-технической деятельности в современном мире становятся технологии компьютерного моделирования. Проведение экспериментальных исследований сложных технических систем, как правило, связано с экономическими и технологическими трудностями. В этой связи увеличивается роль программных инструментов, позволяющих моделировать технические системы до их изготовления и в дальнейшем использовать построенные модели при разработке и эксплуатации оборудования.

Реализация сложных проектов в космической отрасли, как правило, предполагает сотрудничество множества компаний. Для имитационного моделирования технических объектов, состоящих из подсистем, изготавливаемых разными производителями, необходимы программные инструменты, позволяющие не только строить собственные имитаторы, но и интегрировать сторонние модели в комплексное решение. Обеспечение переносимости моделей разных производителей и органи-

зация их взаимодействия базируются на технологиях повторного использования (Simulation-Oriented Model Reuse, SOMR) [1]. В мировой практике научных исследований в настоящий момент такие технологии набирают все большую популярность. Их применение способствует повышению эффективности моделирования и достоверности результатов. Реализация технологий повторного использования продвигается в двух актуальных направлениях: разработки моделей повторного использования на основе существующих технологий и методов; создания прикладных систем моделирования или сред, включающих инструменты повторного использования моделей.

Целью исследования, представленного в данной статье, является разработка программных инструментов, позволяющих строить, интегрировать и совместно использовать имитационные модели бортовой аппаратуры космических систем. Работы ведутся в рамках создания проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования в космической отрасли. Под инструментами понимаются подсистемы программного комплекса, предназначенного для проектирования, разработки, интеграции и использования имитационных моделей. В их числе инструменты информационно-графического моделирования, интеллектуального моделирования [2] и инструменты интеграции имитационных моделей на основе технологии переносимости и повторного использования. Программный комплекс предназначен для имитации командно-программного управления бортовой аппаратурой космических систем.

Представляемые инструменты информационно-графического моделирования позволяют в графическом виде задавать структуру моделируемой системы, визуализировать в процессе проведения имитационных экспериментов передачу пакетов команд и импульсов, выполнять формирование и анализ телеметрической информации. Отображение структуры моделируемой системы информационно-графической моделью расширяет возможности использования модели в качестве средства передачи знаний об устройстве системы, делает модель наглядной и позволяет легко ее модифицировать. Популярные средства моделирования, такие как AnyLogic, Matlab Simulink [3, 4], также обладают графическими инструментами. Кроме того, существуют графические среды разработки технических объектов, например LabView (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) [5]. Однако модели, построенные с их помощью, значительно перегружены из-за универсальности средств и необходимости использования функциональных блоков, предназначенных для обеспечения самих процессов моделирования, визуализации, ввода и вывода данных. В нашем

случае модель отображает структуру бортовых устройств без включения дополнительных элементов. Важно то, что перечисленные среды моделирования напрямую не поддерживают технологии повторного использования имитационных моделей.

Инфраструктуры моделирования, построенные на основе стандартов переносимости имитационных моделей (Simulation Model Portability, SMP2) [6] также, на наш взгляд, обладают существенным недостатком: для графического представления моделей в них используется язык UML [7], однако для моделирования функционирования бортовой аппаратуры недостаточно UML нотации. Предложенные нами инструменты графического моделирования структуры бортовых систем и коммутационных интерфейсов позволяют решать задачи имитации функционирования, а именно, приема-передачи данных по различным каналам связи.

Методы построения моделей в различных средах разнятся. Стандарт SMP2 определяет использование программных моделей, написанных на языке C++. Однако для специалистов предметной области создание таких моделей затруднительно. Нами предложены программные инструменты интеллектуального моделирования, которые позволяют в интерактивном режиме создавать правила функционирования модели, описывающие логику взаимодействия бортовых систем в терминах предметной области. Это значительно облегчает построение моделей. По сравнению с работами других авторов, применяющих интеллектуальные методы для моделирования космической техники [8], наши исследования существенно расширяют возможности инструментов моделирования за счет реализации технологии переносимости, что дает возможность их использования в инфраструктурах имитационного моделирования.

Анализируя состояние работ по использованию инструментов компьютерного моделирования специалистами космической отрасли, мы пришли к выводу, что наиболее широко применяется среда разработки виртуальных приборов LabView. Под виртуальным прибором (Virtual Instruments) в идеологии LabView понимаются программные модули, реализующие различные функции оборудования [5]. Виртуальные приборы целесообразно использовать и для построения комплексных моделей. Поэтому нами также была поставлена и решена задача интеграции виртуальных приборов с другими типами моделей [9].

В статье представлены результаты исследования существующих подходов к организации программных систем с технологией повторного использования и собственный инструментальный комплекс имитационного моделирования. Применительно к задаче моделирования командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата разработанные программные инструменты информационно-

графического и интеллектуального моделирования позволяют в интерактивном режиме создавать правила функционирования модели, описывающие логику взаимодействия бортовых систем космического аппарата. Описаны инструменты интеграции виртуальных приборов, интеллектуальных моделей и SMP моделей в рамках единой программной платформы, поддерживающей технологию переносимости.

2. Задача моделирования командно-программного управления бортовой аппаратурой. Моделирование командно-программного управления бортовой аппаратурой заключается в имитации функционирования систем космического аппарата и функций наземного комплекса управления при приеме и обработке команд. Функционирование модели может быть описано как последовательность действий программных имитаторов.

На рисунке 1 приведена схема информационного взаимодействия программных имитаторов при моделировании командно-программного управления бортовой аппаратурой.

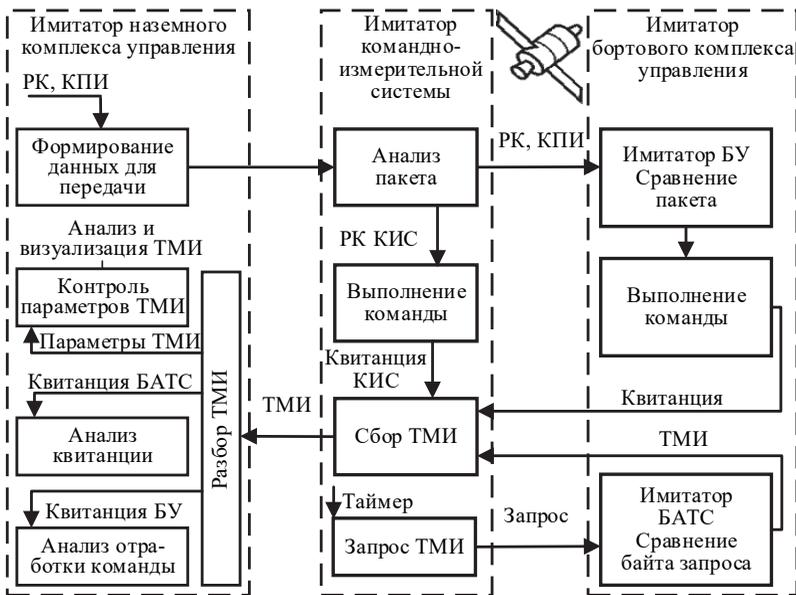


Рис. 1. Схема моделирования командно-программного управления бортовой аппаратурой

На рисунке введены следующие сокращения, принятые в предметной области: РК — радиокomанда, КПИ — командно-программная информация, ТМИ — телеметрическая информация, БАТС – бортовая аппаратура телесигнализации, БУ — бортовые устройства, КИС — командно-измерительная система.

Схема описывает порядок действий, который необходимо реализовать в имитационной модели. Программный имитатор наземного комплекса управления выполняет передачу команды в имитатор командно-измерительной системы космического аппарата. Командно-измерительная система в своем составе содержит приемо-передающие устройства и обеспечивает взаимодействие между наземным и бортовым комплексами управления. Ее назначение — прием и передача различных видов информации с наземного комплекса, формирование и передача на космический аппарат команд и программ управления, стандартных частот и сигналов времени для синхронизации работы бортового оборудования, а также для поддержки режима измерения параметров движения космического аппарата. Информационный обмен между бортовыми системами и наземным комплексом управления осуществляется при помощи следующих типов данных: радиокоманд, командно-программной информации и пакетов телеметрической информации. Для моделирования требуется повторить все режимы работы командно-измерительной системы. Для обеспечения унификации данных используются стандарты Европейского космического агентства: стандарт ESAPSS-04-107 описывает формат телекоманд, ESAPSS-04-106 — формат телеметрической информации.

Получив команду, командно-измерительная система ее анализирует, формирует квитанцию и передает в составе телеметрической информации. Команда выполняется либо передается в программный имитатор бортового комплекса управления. Выполняя команду, командно-измерительная система изменяет состояние оборудования своих подсистем. Имитатор бортового комплекса управления, получив команду, выполняет ее, формирует ответ и добавляет его в телеметрическую информацию. За формирование телеметрической информации бортовых систем отвечает бортовая аппаратура телесигнализации, а за ее передачу — командно-измерительная система и приемо-передающие устройства. Кроме того, командно-измерительная система, собирая телеметрическую информацию бортовых систем, дополняет ее своими квитанциями. Поступающая в наземный комплекс управления телеметрическая информация разбирается и анализируется. Телеметрическая информация позволяет делать вывод о прохождении и обработке команд, а также о состоянии бортовых систем.

Для реализации приведенной схемы моделирования необходимо совместить разные технологические подходы, позволяющие построить комплексную модель из технологически разнородных элементов. С одной

стороны, в комплексную модель могут входить модели устройств от производителей оборудования, построенные по принципу переносимости моделей стандарта SMP2 (SMP модели), а с другой стороны, комплексная модель, как правило, включает собственные разработки проектирующего предприятия или модели, построенные в известных системах, чаще всего в LabView. При этом для успешной реализации часть моделей может быть представлена схематично, только на уровне логики функционирования, а другая часть реализована более детально с учетом физических характеристик, свойств передаваемых сигналов, линий связи и прочего.

Данная схема моделирования может использоваться при наземных испытаниях оборудования бортовых систем космического аппарата [10]. В этом случае имитатор испытываемого оборудования в схеме заменяется реальным устройством.

3. Инструменты информационно-графического моделирования. Для построения структуры моделей авторы предлагают инструменты информационно-графического моделирования. В существующих инфраструктурах имитационного моделирования применяются инструменты графического и неграфического моделирования, которые создают C/C++ код. Например, язык моделирования Modelica [11] позволяет создавать структурные элементы модели и в дальнейшем определять поведение модели, используя графический инструмент моделирования, такой как Dymola. Компилятор Modelica генерирует C++ код модели.

Разрабатывая собственные инструменты графического моделирования, авторы старались, с одной стороны, наиболее полно учесть специфику решаемых задач предметной области, с другой стороны — создать удобные высокоуровневые средства для наглядного построения моделей. Построение модели заключается в визуальном размещении, настройке конфигурации блоков модели, представляющих аппаратную часть бортовых систем, и задании коммутационных интерфейсов, связей и параметров моделируемого оборудования.

На рисунке 2 показан пример графического представления модели командно-программного управления бортовой аппаратурой космических систем. Блоки графической модели отображают различные элементы оборудования, поля в блоках — интерфейсы физических устройств, линии между блоками — коммутационные соединения, стрелки — направления передачи данных.

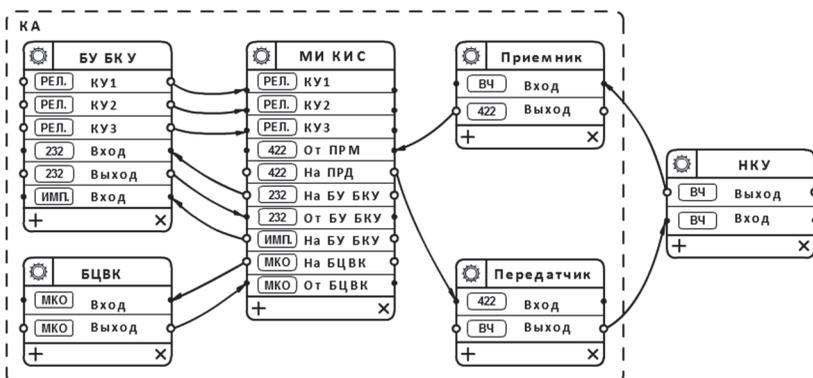


Рис. 2. Графическая модель для имитации командно-программного управления бортовой аппаратурой

Обозначения, введенные на рисунке 2: БУ БКУ — бортовое устройство бортовой комплекс управления, БЦВК — бортовой цифровой вычислительный комплекс, МИ КИС — интерфейсный модуль командно-измерительной системы космического аппарата, НКУ — наземный комплекс управления, КУ — команда управления. Типы коммутационных интерфейсов, используемые в примере: РЕЛ — релейный, 232 — RS-232 (Recommended Standard 232), ИМП — импульсный, 422 — RS-422 (Recommended Standard 422), ВЧ — высокочастотный интерфейс. В графической модели определены основные блоки, имитирующие бортовые системы. Для приема и передачи команд, а также анализа телеметрической информации предназначен имитатор наземного комплекса управления. Имитационные модели могут усложняться включением в них дополнительных элементов и резервных блоков. Модель имеет набор параметров и характеристик, изменяя которые, можно задавать различные варианты конфигурации бортовой аппаратуры космических систем.

Программные инструменты позволяют создавать базы команд и пакеты телеметрической информации произвольной структуры, задавать методы их формирования, передачи и анализа. На рисунке 3 показан редактор пакетов данных, который позволяет формировать базу команд. Обозначения на рисунке: РК — радиокманда, БУ БКУ — бортовое устройство бортовой комплекс управления.

Структуры команд и методы их отработки в имитационной модели могут меняться, что позволяет выявлять различные особенности функционирования бортовых систем.

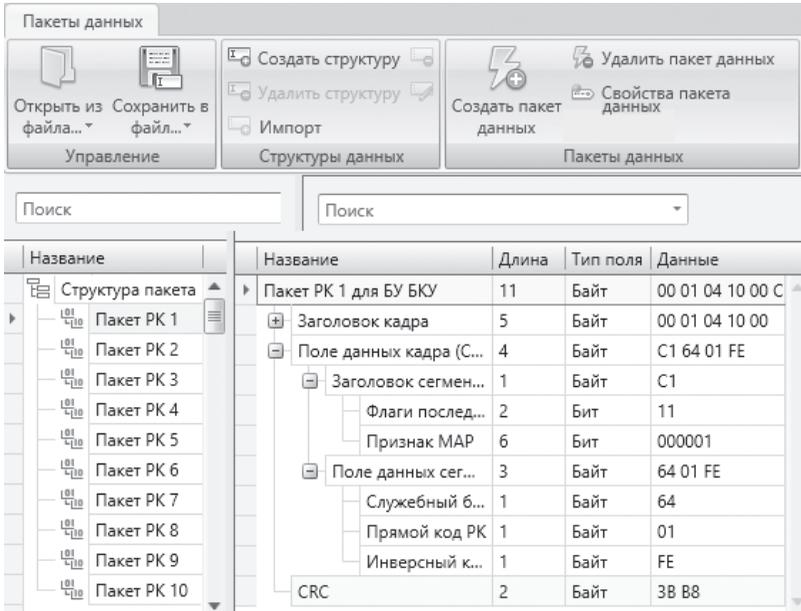


Рис. 3. Редактор пакетов данных

Для каждого элемента модели может быть выполнена графическая детализация. Уровень детализации зависит от целей и задач моделирования. На рисунке 4 показан пример графической детализации модели передатчика.

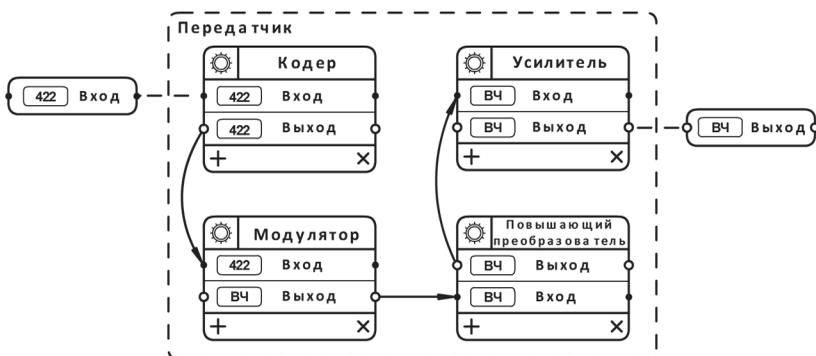


Рис. 4. Графическая детализация элемента модели

Детализация позволяет исследовать особенности приемо-передающего тракта моделируемой системы, имитируя преобразование двоичного пакета в передаваемый в бортовые устройства сигнал. Модель содержит имитаторы кодера, модулятора, преобразователя и усилителя. Выполнение декомпозиции имитатора приемника реализует полную цепочку преобразования данных при передаче, что позволяет моделировать расчет ошибок и потерь на тракте при различных заданных внешних воздействиях.

Тесная интеграция графических инструментов и среды моделирования позволяет использовать графическое представление как при разработке моделей, так и при проведении имитационных экспериментов. Визуальное формирование модели из графических элементов дает существенные преимущества за счет простоты и наглядности проектирования бортовой аппаратуры, анализа и отладки проектных решений.

4. Инструменты интеллектуального моделирования. Инструменты интеллектуального моделирования позволяют задавать правила функционирования отдельных элементов модели и логику взаимодействия между ними в терминах предметной области.

Каждое правило задается символьной конструкцией вида: *Если A то B*, где *A* — условие, *B* — действие. Условие *A* определяет, при каком состоянии элементов модели данное правило может быть применено. Правая часть правила *B* задает действия, определяющие соответствующий шаг решения задачи или способ изменения состояния модели. Условия и действия представляют собой выражения над переменными, заданными в информационно-графической модели, либо функции, изменяющие состояние модели.

Для формирования базы правил разработан редактор, пример его работы показан на рисунке 5. Созданы словарь фактовых переменных и справочник их возможных значений. Диапазоны значений переменных задаются в соответствии со спецификацией оборудования, определенной в технической документации. Словарь может расширяться пользователем. При модификации базы знаний выбираются переменные из словаря, и выполняется контроль допустимых значений. Использование такого подхода позволяет избежать ошибок синтаксиса и структуры правил.

Правила описывают различные варианты взаимодействия элементов графической модели для имитации поведения реального оборудования. Для апробации программных инструментов разработаны информационно-графическая модель и база знаний на основе технической документации на бортовую аппаратуру командно-измерительной системы космического аппарата. Информационно-графическая модель включает командно-измерительную систему и имитаторы окружения: наземного и

бортового комплексов управления. База содержит правила функционирования бортовой аппаратуры, взаимодействия с сопряженными устройствами и поддержки внешнего командно-программного управления.

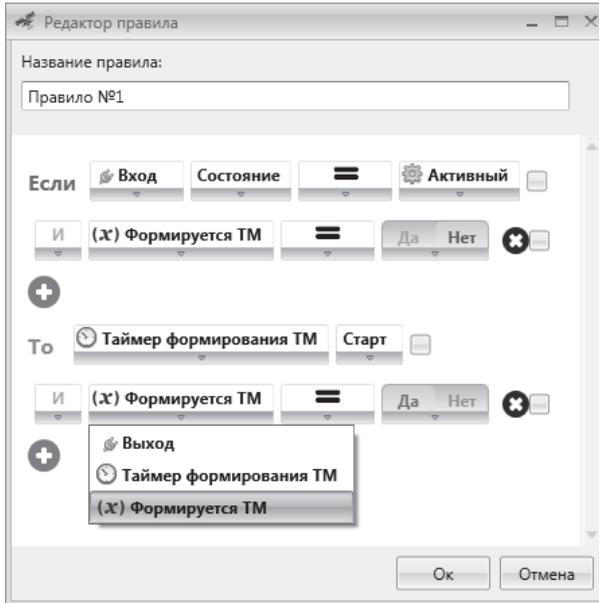


Рис. 5. Редактор базы правил

База знаний использует структуры команд и телеметрической информации, реализованные в реальном оборудовании. Разработка модели была выполнена до поступления от производителя готового оборудования. Проведение имитационных экспериментов позволило наглядно представить методы функционирования бортовой аппаратуры, разработать структуры данных и подготовить программы испытаний. Созданные в имитационной модели база команд и структура телеметрического кадра применялись в дальнейшем при испытаниях командно-измерительной системы. Кроме того, модели окружения командно-измерительной системы легли в основу построения программных имитаторов, предназначенных для проведения автономных испытаний. База знаний дорабатывалась в процессе проведения испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. Построение базы знаний на основе технической документации и дальнейшая ее доработка по результатам про-

веденных испытаний бортовой аппаратуры позволили выявить особенности реализации оборудования, не указанные производителем в спецификации и других документах.

База знаний имеет модульную реализацию. В каждом модуле представлены правила, относящиеся к одному элементу графической модели, представляющему бортовое оборудование. Такой подход обусловлен поведением моделируемых систем, функционирование которых определяется собственной логикой. Влияние сопряженных устройств возможно только на уровне данных, сигналов, импульсов или изменений других параметров, поступающих на входные интерфейсы. Модули базы знаний содержат правила общего назначения, правила выдачи командной и командно-программной информации на системы космического аппарата, формирования запросов телеметрической информации, управления и контроля состояния бортовой аппаратуры, задания режимов и интерфейсов передачи данных и пр. Поддерживаемая модульностью позволяет добавлять, удалять или модифицировать отдельные правила без изменения логики работы независимых элементов модели. При построении базы знаний существенную роль в достижении ее корректности обеспечивает тесная интеграция с графическим представлением процесса моделирования. Проведение имитационных экспериментов с визуализацией на графической модели и сопоставление результатов моделирования с техническими документами позволили конструктору оценить полноту и непротиворечивость базы знаний. В текущей реализации дополнительные методы верификации базы знаний не предусмотрены.

Для наглядности восприятия базы знаний специалистом предметной области созданные правила интерпретируются в конструкции, приближенные к естественно языковым. Примеры правил приема, передачи, отработки команд, поступающих от наземного комплекса управления, в бортовые системы приведены далее:

Правило 1:

Если интерфейс «Вход» принял «Команду»

И тип команды = «Команда МИ КИС»

И значение команды = «Включить ПРМ»

То выдать импульс на вход «Управление ПРМ»

Правило 2:

Если интерфейс «Вход» принял «Команду»

И значение команды = «Рестарт»

То комплект МИ КИС = Основной

И Скорость формирования ТМИ = 1000 бит/с

Правило 3:

Если таймер «Формирование ТМИ» в состоянии «Активный»
То передать массив данных «ТМИ» на вход «БУ БКУ»

В приведенных примерах правил используются следующие обозначения: БУ БКУ — бортовой комплекс управления, МИ КИС — интерфейсный модуль командно-измерительной системы, ПРМ — приемопередающее устройство, ТМИ — телеметрическая информация, Команда — массив байт заданной структуры, определяющий радиокomанду в соответствии с техническим заданием на бортовое оборудование.

Помимо моделирования определенных действий, связанных с прохождением команд, правила позволяют имитировать реакции системы на условия функционирования и выполнять контроль значений параметров. Примеры правил, описывающих реакции командно-измерительной системы на изменения параметров «Напряжение питания» и «Максимальный ток потребления» приведены далее:

Правило 4:

Если Напряжение питания < 21 В

То Питание = Выкл

Правило 5:

Если Максимальный ток потребления $> 0,3$ А

То Сервисное сообщение = «Недопустимое значение»

Значения параметров могут меняться в процессе моделирования. Такие правила позволяют моделировать нештатные ситуации и предназначены для анализа действий реального оборудования при испытаниях. База знаний представляет собой хранилище функциональных и технологических процессов, позволяющих не только наблюдать, но и управлять логическим выводом. Сценарии функционирования моделей, возмущающие воздействия внешней среды на элементы бортовой аппаратуры, вызывающие сбои работы оборудования, ошибки, связанные с потерями на линиях связи, задаются правилами в базе знаний. Однако такой способ не универсален, поскольку влияние распространяется на всю модель и не может изменяться в процессе проведения имитационных экспериментов. Данный вопрос будет прорабатываться в дальнейшем.

На рисунке 6 показан пример описания модели, которая реализована средствами интеллектуального моделирования. Модель имеет графическое представление, набор параметров, базу правил и таймеры, управляющие логическим выводом или вызывающие действия по изменению состояния модели. Из реализаций отдельных моделей оборудования строится комплексная модель. Состояние каждой модели представляется как совокупность параметров, значений таймеров, фактовых переменных, данных на входах коммутационных интерфейсов.



Рис. 6. Пример логической модели командно-измерительной системы

Для имитационного моделирования реализован классический алгоритм логического вывода, дополненный возможностью выполнения правил по таймерам. Применение таймеров позволяет имитировать временные характеристики работы оборудования, например, формирование и передачу телеметрической информации с периодичностью, заданной в технической документации. На каждом шаге моделирования выбираются действия, определяемые набором продукционных правил, применимых к текущему состоянию модели. Выполнение действий изменяет состояние модели в зависимости от принятых пакетов данных, активизирует таймеры или вызывает процесс передачи пакетов через заданный в модели интерфейс.

Алгоритм логического вывода показан на рисунке 7. Алгоритм используется при имитационном моделировании функционирования бортовых систем. Реализация логического вывода выполнена на основе агентного подхода, где каждый агент отвечает за функционирование отдельной модели, выполняя прямую цепочку вывода на основе набора продукционных правил.

В момент старта имитационного моделирования программное обеспечение собирает данные о состоянии моделей и запускает таймеры. Правила разбиты на модули, описывающие отдельные бортовые устройства. Для управления связями между ними построена таблица коммутации. Она содержит информацию об интерфейсах моделей и способах их соединения для обеспечения информационного взаимодействия. Поступление на входной интерфейс какой-нибудь из моделей данных, представ-

ляющих радиокоманды или командно-программную информацию, вызывает изменение состояния моделей. Для каждой модели изменение ее состояния запускает программного агента, который выполняет сопоставление с базой знаний набора фактовых переменных, имеющих значения определенные для данного состояния модели. В результате сопоставления выбираются правила, применимые к текущему состоянию модели, формируется конфликтный набор (КН). Выполнение выбранных правил изменяет состояние модели. В случае, если в определенный момент времени в базе знаний не находится правил, применимых к текущему состоянию модели, логический вывод останавливается, программный агент переходит в режим ожидания.

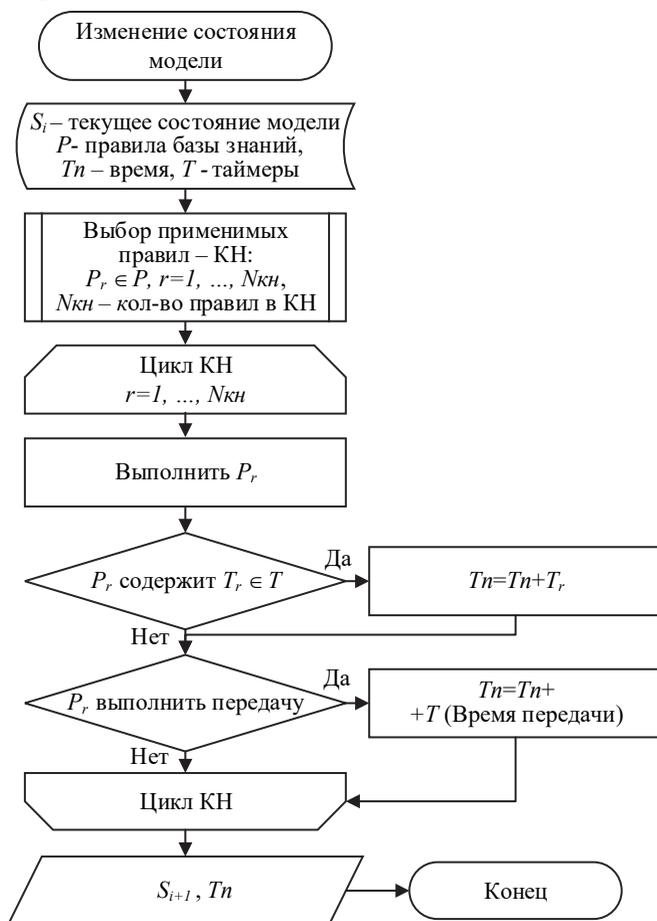


Рис. 7. Алгоритм логического вывода

Для визуализации имитационного моделирования применяется графическая модель, на которой отражаются изменение состояния и активности элементов модели, а также формирование и передача пакетов данных через коммутационные интерфейсы. Созданные модели предназначены для исследования особенностей функционирования бортовых систем. Для улучшения восприятия конструктором процесса моделирования введен коэффициент замедления работы модели, что позволяет наблюдать одновременное выполнение нескольких процессов.

Если построение имитационных моделей выполняется в соответствии с технической документацией на уже созданное оборудование, то такая модель является основой для проведения его испытаний. В этом случае характеристики элементов модели предназначены для оценки параметров функционирования оборудования, контроля результатов испытаний на основе эталонных критериев, формирования реакций при выходе за граничные условия, а также формирования рекомендаций по детализации процесса испытаний.

Представленный способ задания методов моделирования в виде правил нагляден и понятен специалисту предметной области. Инструменты интеллектуального моделирования наряду с графическими инструментами обеспечивают высокий уровень проблемной ориентации инфраструктуры имитационного моделирования. Они позволяют конструктору оперировать привычными семантическими конструкциями для построения моделей функционирования бортовой аппаратуры космических систем [12]. Представленные программные инструменты апробированы при конструировании командно-измерительной системы на предприятии-изготовителе спутниковых систем [13].

5. Инструменты интеграции имитационных моделей на основе стандарта SMP2. Реализация функций отдельных элементов модели может выполняться в виде правил (condition-action rules), виртуальных приборов, созданных в среде Labview, или подключаемых программ на C++. Если для моделирования бортового устройства существенное значение имеет его программная реализация, требуется поддержка дополнительных способов представления моделей. Для построения комплексных решений и обеспечения совместного использования различных реализаций моделей разработаны программные инструменты интеграции.

Существует целый ряд международных стандартов, определяющих правила построения систем имитационного моделирования, которые обеспечивают реализацию технологий повторного использования имитационных моделей. В работе [14] проведен обзор некоторых стандартов,

поддерживающих данную технологию. Стандарт «High Level Architecture» (HLA) (IEEE 1516) определяет архитектуру распределенных систем имитационного моделирования. Первоначально он разрабатывался для потребностей военной отрасли. Его разработчик — Department of Defense, Defense Modeling and Simulation Office. Еще один стандарт, предназначенный для военных целей, — «Distributed Interactive Simulation» (DIS) (IEEE 1278). DIS – это открытый стандарт для сопровождения взаимодействия моделей реального времени на распределенных системах. Универсальный стандарт «The Foundation for Intelligent Physical Agents» предназначен для агентного моделирования.

В космической отрасли базовым технологическим стандартом, определяющим правила построения систем имитационного моделирования, является стандарт Европейского космического агентства «Simulation Model Portability» (текущая редакция SMP2) [6]. Программную среду, реализующую стандарт SMP2, называют инфраструктурой имитационного моделирования (Simulation Infrastructure) [15]. В работе [16] отмечается, что стандарты Европейского космического агентства обеспечивают нормативную основу, определяющую информационные элементы и программные компоненты, которые необходимо сформировать для построения собственной инфраструктуры имитационного моделирования.

Стандарт SMP2 нашел широкое применение. На его основе построены такие инфраструктуры, как SimSAT Европейского космического агентства [17], SimTG — Astrium Satellites [18], симулятор центра управления полетами на основе SWARMSIM [7], программное обеспечение южнокорейского института аэрокосмических разработок [19] и др. Несмотря на общий подход, вопросы построения моделей в каждом из приведенных примеров решаются оригинальными методами. Либо имитационные модели строятся в системах моделирования, не поддерживающих стандарт, затем используются инструменты интеграции с SMP системами, такие, например, как программный комплекс MOSAIC, выполняющий автоматическую передачу моделей MATLAB/Simulink в SMP2-стандарт [20].

Среди работ, использующих инфраструктуру имитационного моделирования на основе стандарта SMP2, стоит отметить крупный научно-исследовательский проект MERLIN [21]. Проект направлен на разработку спутников дистанционного зондирования для мониторинга парникового газа. Это франко-германский проект партнерства, «состоящего из обороны и космоса»: Airbus, CNES и Thales Alenia Space. Применение SMP2 позволило выполнить стандартизацию всех компонентов пространственной системы, сделать их более надежными, снизить затраты и оптимизировать график разработки. Уникальность проекта

MERLIN заключается в интеграции имитационных моделей, разрабатываемых исследователями на четырех различных SMP2 платформах имитационного моделирования. Положительный опыт этих исследований показывает актуальность и эффективность построения имитационных моделей на основе стандарта SMP2.

В России исследования по моделированию сложных технических комплексов и систем проводятся в различных прикладных направлениях, в том числе в области космического приборостроения [22, 23]. В работах российских исследователей для моделирования сложных технических комплексов в основном используются системы аналитического и имитационного моделирования, такие как AnyLogic [24], MATLAB, Arena, GPSS, Extend, iThink Analyst, Process Model, MvStadium и другие [25, 26], либо создаются собственные инструменты [27, 28]. Всесторонние исследования, направленные на создание ответственных программных продуктов, поддерживающих технологию повторного использования, необходимы для поддержки импортонезависимости российских космических разработок.

Представленный в настоящей работе инструментальный комплекс имитационного моделирования предназначен для построения моделей бортовой аппаратуры и их апробации на предприятии-изготовителе спутниковых систем. Модель командно-программного управления бортовой аппаратурой космических систем объединяет модели отдельных подсистем. Полученная в результате интеграции комплексная модель должна обеспечивать исследование поведения моделируемого объекта в целом и влияния составных частей друг на друга, при этом она должна быть легко модифицируема и расширяема.

Для интеграции моделей их различные реализации приводятся к унифицированному виду, что позволяет применять одни и те же подходы и программные инструменты подготовки и выполнения имитационных экспериментов к различным реализациям моделей. Для всех моделей создается автоматическая или загружается при импорте метамодель, написанная на формальном языке Simulation Model Definition Language (SMDL) [29]. В соответствии со стандартом SMP2 метамодель содержит структуры каталога, конфигурации, сборки, планировщика, а также реализацию методов моделирования в виде бинарных файлов. Инструменты информационно-графического моделирования позволяют дополнять модели структурами команд и телеметрии, определять интерфейсы приема-передачи данных, а также задавать коммутационные соединения и направления информационного взаимодействия.

Приведение различных реализаций моделей к единым компонентам проблемно-ориентированной среды моделирования позволяет конструктору бортовой аппаратуры строить имитационные модели, применяя различные варианты их реализаций. Вне зависимости от того, реализованы ли функции модели на специализированном языке программирования, или описаны в виде правил, пользователь может оперировать ими одинаково. Различия реализаций для него будут видны только в виде пиктограмм элементов графической модели. Схематично эта идея показана на рисунке 8.

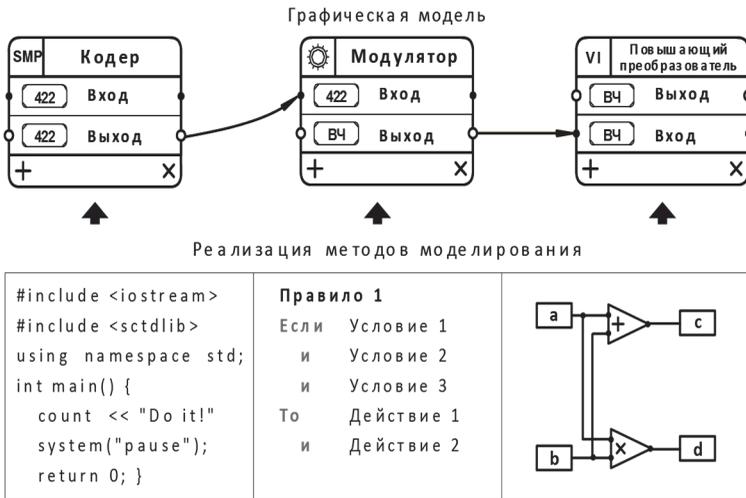


Рис. 8. Представление элементов комплексной модели

Так, например, для построения комплексной модели командно-программного управления бортовой аппаратурой требуется выполнить реализацию моделей бортовых устройств, командно-измерительной системы и приемо-передающего оборудования. Предположим, что методы моделирования имитатора бортовых устройств реализованы на C++, имитатор командно-измерительной системы выполнен на основе базы правил, а для моделирования приемо-передающего устройства используются виртуальные приборы, реализованные в среде LabVIEW. После интеграции этих моделей в инфраструктуре пользователь оперирует их графическим представлением независимо от способа реализации. Сама реализация моделей скрыта от пользователей и все функции по выполнению моделей и их взаимодействию берет на себя инфраструктура имитационного моделирования. Выполнение моделей происходит с помощью механизмов стандарта SMP2, среди них хранитель

времени (Time Keeper), планировщик (Scheduler), система логирования (Logger), менеджер событий (Event Manager), реестр ссылок (Link Registry), система вызова моделей (Resolver).

Для всех типов моделей в инфраструктуре поддерживается система каталогов, которая представляет собой описание пространства имен, типов данных, структур, классов и интерфейсов. Кроме того, в каталоге определяются типы событий для межмодельного взаимодействия. На основе различных экземпляров модели выполняется сборка. Это один из атрибутов, описанных в стандарте и предназначенных для задания конфигурации экземпляров моделей. Ход выполнения имитационных экспериментов задается в планировщике. Для моделей SMP2 он формируется по SMDL-описанию. Для других типов моделей, включая комплексные, он задается инструментами инфраструктуры. Планировщик определяет последовательности вызовов моделей и методы перехода между состояниями имитационного моделирования. Управление ходом моделирования в процессе имитационных экспериментов также входит в функции планировщика. Реализация модели зависит от ее типа и задается в виде бинарного кода, правил базы знаний или библиотеки виртуальных приборов.

Интеграция имитационных моделей на основе стандарта SMP2 позволяет получать разнообразные и качественные решения, используя знания групп инженеров, имеющих большой опыт проектирования бортовой аппаратуры. Создание инфраструктуры имитационного моделирования на основе стандарта SMP2 для предприятий-производителей космического оборудования позволит российским разработкам легко интегрироваться в международные проекты. Авторы надеются, что работы по созданию инфраструктуры имитационного моделирования на основе стандарта SMP2 будут способствовать развитию технологий переносимости имитационных моделей в российском научном сегменте.

7. Заключение. Разработан инструментальный программный комплекс для поддержки имитационного моделирования бортовой аппаратуры космических систем. Программный комплекс позволяет строить, исполнять и интегрировать имитационные модели бортовых систем космических аппаратов. В основу положена технология повторного использования, определенная в международном стандарте Simulation Model Portability (SMP2). Оригинальные средства информационно-графического и интеллектуального моделирования обеспечивают наглядность и доступность процесса формирования моделей архитектуры и функционирования бортовых систем. Разработанный программный комплекс позво-

ляет конструкторам не только строить собственные модели, но и объединять имитаторы устройств разных производителей, проводить имитационные эксперименты для подготовки и анализа технических проектов.

Такая интеграция обеспечивает композицию моделей разных производителей оборудования в единый имитационный комплекс. Так, представленные инструменты позволили построить комплексную имитационную модель командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата путем интеграции SMP моделей бортовых устройств, интеллектуального имитатора командно-измерительной системы и виртуальных приборов для моделирования приемо-передающих устройств. Допускается использование имитаторов в сочетании с реальной аппаратурой, например, при проведении ее испытаний.

Применение инструментов имитационного моделирования на предприятии-изготовителе спутниковых систем позволит повысить качество и обоснованность конструкторских решений на различных этапах жизненного цикла производства космической техники и будет способствовать накоплению и передаче знаний об устройстве бортовой аппаратуры. Предложенный подход обеспечивает экономические и технологические преимущества для развития наукоемкого производства космической техники.

Литература

1. Liu Y., Zhang L., Zhang W., Hu X. An overview of simulation-oriented model reuse // Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems. 2016. vol. 646. pp. 48–56.
2. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment // ACSR-Advances in Computer Science Research. 2015. vol. 18. pp. 943–945.
3. AnyLogic 7.2 Released – AnyLogic Simulation Software. URL: www.anylogic.com (дата обращения: 02.06.2016).
4. Schmidt A., Durak U., Pawletta T. Model-based testing methodology using system entity structures for Matlab/Simulink models // SIMULATION: Transactions of the society for modeling and simulation international. 2016. vol. 92-8. pp. 729–746.
5. Bress T. Effective LabView Programming // NTS Press. 2013. 720 p.
6. Simulation modelling platform. ECSS E-40-07 // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 49 p.
7. Friizen P., Segneri D., Pignede M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC // Proceedings of the 11th International Workshop on Simulation & EGSE facilities for Space Programmes. ESTEC. 2010. 8 p.
8. Eickhoff J. Simulating Spacecraft System // Springer. 2009. 353 p.
9. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E., Markov A. Problem-oriented integration of SMP-models in the simulation modeling infrastructure // Advances in Intelligent Systems Research. 2017. vol. 141. pp. 121–124.
10. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V. Command and Software Control Simulation for Testing Spacecraft Onboard Equipment // International Conference on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application. 2016. pp. 349–353.

11. *Schamai W., Fritzsion P., Paredis C.* Translation of UML State Machines to Modelica: Handling Semantic Issues // *Simulation*. 2013. pp. 498–512.
12. *Nozhenkova L.F. et al.* Unified description of the onboard equipment model on the basis of the «Simulation Model Portability» standard // *Advances in Intelligent Systems Research*. 2016. vol. 133. pp. 481–484.
13. *Ноженкова Л.Ф. и др.* Комплексная поддержка конструирования бортовых систем контроля и управления космических аппаратов на основе интеллектуальной имитационной модели // *Информационные технологии*. 2015. № 9. С. 706–714.
14. *Лопаткин Р.Ю., Петров С.А., Игнатенко С.Н., Иващенко В.А.* Перспективы применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управлении технологическими системами // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2015. № 17(1189). С. 61–71.
15. *Arguello L., Miró J., Gujer J., Nergaard K.* SMP: A Step Towards Model Reuse in Simulation // *ESA Bulletin*. 2000. pp. 108–112.
16. *Eito-Brun R.* Design of an Ontologies for the Exchange of Software Engineering data in the Aerospace Industry // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. vol. 649. pp. 71–78.
17. *Sarkarati M., Merri M., Spada M.* Cloud based architectures in ground systems of space missions // *GSW 2013. ESA*. 2013. 14 p.
18. *Cazenave C., Arrouy W.* Implementing SMP2 standard within SimTG simulation infrastructure // *SESP 2012: Simulation and EGSE for space programmes. ESTEC. Noordwijk*. 2012. 13 p.
19. *Koo C.H. et al.* Development of simulation infrastructure compatible with ESA SMP for validation of flight software and verification of mission operation // *SESP (ESA): Simulation and EGSE for Space Programmes*. 2012.
20. *Lammen W.F., Jaffry D., Moelands J.M., Wijnands Q.* Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic model transfer // *Report. Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwij*. 2016. 21 p.
21. *Strzepek A. et al.* A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission // *14th International Conference on Space Operations*. 2016. pp. 2410.
22. *Стратилатов Н.Р., Куренков В.И., Кучеров А.С., Якищук А.А.* Методические основы разработки проблемно-ориентированной системы выбора основных проектных параметров космических аппаратов // *Вестник Самарского университета. Аэро-космическая техника, технологии и машиностроение*. 2016. Т. 15. № 2. С. 68–79.
23. *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.
24. *Срульдинов А.Р., Варламова С.А.* Построение модели предоставления технической поддержки пользователей на языке моделирования AnyLogic // *Журнал «Juvenis scientia»*. Вып. 3. 2016. С. 11–14.
25. *Андреев А.М., Хацаюк В.О.* Алгоритм оценивания пространственной доступности радионизлучений космических аппаратов командно-ретрансляционных систем с использованием имитационного моделирования // *Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2016. № 650. С. 57-61.
26. *Марченко А.С., Сулин А.Б.* Логическое моделирование элемента системы жизнеобеспечения в режиме реального времени // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2016. № 2(41). С. 93–103.
27. *Жихарев А.Г. и др.* Об имитационном моделировании производственно-технологических систем // *Научный результат. Сер. Информационные технологии*. 2016. Т. 1. № 3(3). С. 24–31.

28. *Миков А.И., Замятина Е.Б.* Опыт использования методов искусственного интеллекта при разработке систем имитации // Материалы конференции «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века». 2016. С. 19–23.
29. Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07 // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 169 p.

Ноженкова Людмила Федоровна — д-р техн. наук, профессор, заведующая отделом прикладной информатики, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. Область научных интересов: информационные технологии, интеллектуальные системы, интегрированные системы, оперативная аналитическая обработка данных, геоинформационные экспертные системы, поддержка принятия решений, чрезвычайные ситуации, мониторинг, поддержка размещения заказов, поддержка конструирования бортовой аппаратуры, моделирование бортовой аппаратуры, проверочные испытания бортовой аппаратуры. Число научных публикаций — 190. expert@icm.krasn.ru; Академгородок, 50, стр. 44, Красноярск, 660036; р.т.: +7(391)2-90-79-54.

Исаева Ольга Сергеевна — к-т техн. наук, старший научный сотрудник отдела прикладной информатики, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. Область научных интересов: системный анализ, информационные технологии, методы искусственного интеллекта. Число научных публикаций — 55. isaeva@icm.krasn.ru; Академгородок, 50, стр. 44, Красноярск, 660036; р.т.: +79135194099.

Евсюков Александр Анатольевич — к-т техн. наук, старший научный сотрудник отдела прикладной информатики, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. Область научных интересов: экспертные системы, 3D-моделирование, компьютерная графика. Число научных публикаций — 43. alev@icm.krasn.ru; Академгородок, 50, стр. 44, Красноярск, 660036; р.т.: +7(391)2-90-79-54.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-41-242042) и Правительства Красноярского края.

L.F. NOZHENKOVA, O.S. ISAEVA, A.A. EVSYUKOV
**TOOLS OF COMPUTER MODELING OF THE SPACE SYSTEMS'
 ONBOARD EQUIPMENT FUNCTIONING**

Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Evsyukov A.A. Tools of Computer Modeling of the Space Systems' Onboard Equipment Functioning.

Abstract. The article describes a tool software complex allowing to build, execute and integrate simulation models of the space systems' onboard equipment functioning. It is based on a reuse technology defined by the international Simulation Model Portability (SMP2) standard. Along with the standard rules for building integrable models, we have designed additional original tools of information-graphical and intellectual modeling. In this way, we provide graphical construction of onboard systems' architecture models, set the methods of model function and determine the options of command execution by onboard equipment.

This work is part of creation of software for the problem-oriented simulation modeling infrastructure in space industry. This software complex will allow designers not only to build their own onboard systems' models, but also to unite simulators of the equipment produced by different companies and to make simulation tests for preparation and analysis of technical projects. Our approach provides economic and technological advantages for space industry's knowledge-intensive production development.

Keywords: simulation infrastructure, simulation model portability standard, spacecraft, onboard equipment, command and measuring system.

Nozhenkova Ludmila Fedorovna — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of applied informatics department, Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences. Research interests: information technologies, intelligent systems, integrated systems, OLAP, geoinformation expert systems, decision support system, support for placing orders, support for the design of onboard equipment, modeling and testing of onboard equip-men. The number of publications — 190. expert@icm.krasn.ru; 50, Akademgorodok, building 44, Krasnoyarsk, 660036, Russia; office phone: +7(391)2-90-79-54.

Isaeva Olga Sergeevna — Ph.D., senior researcher of applied computer science department, Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences. Research interests: system analysis, information systems, databases, artificial intelligence. The number of publications — 55. isaeva@icm.krasn.ru; 50, Akademgorodok, building 44, Krasnoyarsk, 660036, Russia; office phone: +79135194099.

Evsyukov Alexander Anatolievich — Ph.D., senior researcher of applied informatics department, Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences. Research interests: expert systems, 3D-modeling, computer graphics. The number of publications — 43. alev@icm.krasn.ru; 50, Akademgorodok, building 44, Krasnoyarsk, 660036, Russia; office phone: +7(391)2-90-79-54.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 16-41-242042) and Government of Krasnoyarsk Territory.

References

1. Liu Y., Zhang L., Zhang W., Hu X. An overview of simulation-oriented model reuse. Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems. 2016. vol. 646. pp. 48–56.

2. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment. ACSR-Advances in Computer Science Research. 2015. vol. 18. pp. 943–945.
3. AnyLogic 7.2 Released – AnyLogic Simulation Software. Available at: www.anylogic.com. (accessed: 02.06.2016).
4. Schmidt A., Durak U., Pawletta T. Model-based testing methodology using system entity structures for Matlab/Simulink models. *SIMULATION: Transactions of the society for modeling and simulation international*. 2016. vol. 92-8. pp. 729–746.
5. Bress T. Effective LabView Programming. NTS Press. 2013. 720 p.
6. Simulation modelling platform. ECSS E-40-07. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 49 p.
7. Fritzen P., Segneri D., Pignede M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC. Proceedings of the 11th International Workshop on Simulation & EGSE facilities for Space Programmes. ESTEC. 2010. 8 p.
8. Eickhoff J. Simulating Spacecraft System. Springer. 2009. 353 p.
9. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E., Markov A. Problem-oriented integration of SMP-models in the simulation modeling infrastructure. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2017. vol. 141. pp. 121–124.
10. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V. Command and Software Control Simulation for Testing Spacecraft Onboard Equipment. International Conference on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application. 2016. pp. 349–353.
11. Schamai W., Fritzon P., Paredis C. Translation of UML State Machines to Modelica: Handling Semantic Issues. *Simulation*. 2013. pp. 498–512.
12. Nozhenkova L.F. et al. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the «Simulation Model Portability» standard. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2016. vol. 133. pp. 481–484.
13. Nozhenkova L.F. et al. [Complex support of designing onboard control and management systems of spacecrafts on the basis of intellectual simulation model]. *Informacionnye tehnologii – Information Technology*. 2015. vol. 9. pp. 706–714. (In Russ.).
14. Lopatkin R.Ju., Petrov S.A., Ignatenko S.N., Ivashhenko V.A. [Prospects for applying simulation modeling in automation tasks and control of technological systems]. *Visnik NTU «HPI». Serija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. – Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Mechanic-technological systems and complexes*. Harkiv: NTU «HPI». 2015. vol. 17(1189). pp. 61–71. (In Russ.).
15. Arguello L., Miró J., Gujer J., Nergaard K. SMP: A Step Towards Model Reuse in Simulation. *ESA Bulletin*. 2000. pp. 108–112.
16. Eito-Brun R. Design of an Ontologies for the Exchange of Software Engineering data in the Aerospace Industry. Communications in Computer and Information Science. 2016. vol. 649. pp. 71–78.
17. Sarkarati M., Merri M., Spada M. Cloud based architectures in ground systems of space missions. GSW 2013. ESA. 2013. 14 p.
18. Cazenave C., Arrouy W. Implementing SMP2 standard within SimTG simulation infrastructure. SESP 2012: Simulation and EGSE for space programmes. ESTEC. Noordwijk. 2012. 13 p.
19. Koo C.H. et al. Development of simulation infrastructure compatible with ESA SMP for validation of flight software and verification of mission operation. SESP (ESA): Simulation and EGSE for Space Programmes. 2012.
20. Lammen W.F., Jaffry D., Moelands J.M., Wijnands Q. Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic model transfer. Report. Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwijk. 2016. 21 p.
21. Strzepek A. et al. A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission. 14th International Conference on Space Operations. 2016. pp. 2410.

22. Stratilatov N.R., Kurenkov V.I., Kuchеров A.S., Jakishhik A.A. [Methodical bases for the development of a problem-oriented system for selecting the basic design parameters of spacecraft]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashinostroenie – Bulletin of the Samara University. Aerospace technology, technology and engineering*. 2016. vol. 15. no. 2. pp. 68–79. (In Russ.).
23. Homonenko A.D., Starobinec D.Ju., Lohvickij V.A. [A model for assessing the operational efficiency of the on-board control complex of space-borne remote sensing of the Earth]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 3(46). pp. 49–64. (In Russ.).
24. Srul'dinov A.R., Varlamova S.A. [Building a model for providing technical support to users in AnyLogic modeling language]. *Zhurnal «Juvenis scientia» – Journal «Juvenis scientia»*. vol. 3. 2016. pp. 11–14. (In Russ.).
25. Andreev A.M. Hacajuk V.O. [Algorithm for estimating the spatial availability of radio emissions of spacecraft command-retransmission systems using simulation simulations]. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhajskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016. vol. 650. pp. 57–61. (In Russ.).
26. Marchenko A.S., Sulin A.B. [Logical modeling of the life support system element in real time]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tehničeskie nauki – Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2016. vol. 2 (41). pp. 93–103. (In Russ.).
27. Zhiharev A.G., Korchagina K.V., Buzov P.A., Akulov Ju.V., Zhihareva M.S. [On the simulation of production and technological systems]. *Nauchnyj rezul'tat. Ser. Informacionnye tehnologii – Scientific Result. Ser. Information Technology*. 2016. Issue 1. vol. 3(3). pp. 24–31. (In Russ.).
28. Mikov A.I., Zamjatina E.B. [Experience in the use of artificial intelligence methods in the development of simulation systems]. *Materialy konferencii «Iskusstvennyj intellekt v reshenii aktual'nyh social'nyh i jekonomicheskijh problem XXI veka»* [Proceedings of the conference «Artificial Intelligence in Solving the Urgent Social and Economic Problems of the 21st Century»]. 2016. pp. 19–23. (In Russ.).
29. Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands. 2011. 169 p.