



УДК 629.78:004.94

Л. Ф. Ноженкова, О. С. Исаева, Е. А. Грузенко
Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия

ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ¹

Разработан программный комплекс, предназначенный для автоматизированной поддержки различных этапов конструирования бортовой аппаратуры. Система позволяет выполнять информационно-графическое моделирование архитектуры, а также наглядное имитационное моделирование функционирования командно-измерительной системы в соответствии с назначением и условиями работы реального оборудования.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая аппаратура, командно-измерительная система, программно-математическая модель, имитационное моделирование, телекоманды, телеметрия, подготовка сценариев испытаний, анализ функционирования оборудования, учебно-исследовательская система.

L. F. Nozhenkova, O. S. Isaeva, E. A. Gruzenko
Institute of computational modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

PROGRAM AND MATHEMATICAL MODEL OF THE SPACECRAFT COMMAND-MEASURING SYSTEM'S ONBOARD EQUIPMENT

We have developed a program complex for automated support of different stages of onboard equipment construction. The system allows to complete informational and graphical architecture modeling, as well as visual simulation modeling of the command-measuring system function in accordance with the purpose and work conditions of the real equipment.

Key words: spacecraft, onboard equipment, command-measuring system, program and mathematical model, simulation modeling, telecommands, telemetry packets, preparation of scenarios of tests, test execution support, equipment functions analysis, educational and research system.

Управление космическим аппаратом осуществляется бортовым комплексом управления, который представляет собой совокупность приборов и устройств с информационным и программным обеспечением. Бортовой

комплекс управления отвечает как за управление движением космического аппарата, так и за функционирование бортового оборудования [1]. Внешнее командно-программное управление, контроль и анализ функционирования обеспечиваются наземным комплексом управления. Связь бортового комплекса управления с наземным комплексом управления осуществляется через командно-измерительную систему космического аппарата. Командно-измерительная система предна-

© Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А., 2015

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в Институте вычислительного моделирования СО РАН (договор № 02.G25.31.0041).

значена для измерения параметров движения космического аппарата, приема и передачи различных видов информации, формирования и передачи на космический аппарат команд и программ управления, стандартных частот и сигналов времени для синхронизации работы бортового комплекса управления [2].

Современная командно-измерительная система представляет собой сложный комплекс технологических и вспомогательных подсистем, объединенных общей системой управления и функционирующих в непрерывном взаимодействии с бортовыми системами. Разработка способов организации взаимодействия подсистем и вариантов реализации их функционирования характеризуется большой вариативностью. Интуитивные и недостаточно обоснованные проектные решения могут привести к грубым просчетам и снижению эффективности и надежности проектируемых командно-измерительных систем. Выполнение экспериментальных исследований и апробации конструкторских решений, направленных на оценку достоверности результатов проектирования, экономически необоснованно и ресурсоемко. Альтернативой дорогостоящим экспериментам является применение методов системного анализа и компьютерного моделирования. Моделирование позволяет наглядно проводить имитационные эксперименты, анализировать и модифицировать проектные решения, что сокращает время разработки и повышает качество технических проектов.

Не существует универсальных проектных решений для построения и технического обеспечения бортовой аппаратуры. Это связано с широким спектром назначения и условий функционирования космических аппаратов, постоянным увеличением требований к надежности и сроку их активного существования. В настоящий момент на основе методов системной инженерии развиваются новые подходы к вопросам проектирования и эксплуатации систем космических аппаратов [1]. Эти принципы должны быть заложены в технологии разработки командно-измерительных систем. Необходимо разработать научно обоснованные подходы и программно-инструментальные решения, которые бы позволили моделировать различные особенности функционирования командно-измерительной системы.

1. Задачи моделирования в жизненном цикле космических проектов

Моделирование должно сопровождать все этапы жизненного цикла проектирования и разработки космических систем. Анализ этапов жизненного цикла и особенностей функционирования командно-измерительных систем позволяет определить задачи моделирования.

Европейской кооперацией по стандартизации в области космической техники разработан ряд стандартов, определяющих системный подход и компьютерное моделирование как рекомендованные технологии сопровождения различных этапов реализации космических проектов [3; 4].

Согласованное использование системного подхода и методов моделирования на протяжении жизненного цикла дает преимущества при реализации космических проектов. Применение системного подхода, рекомендованного в стандартах, предполагает представление объекта исследования в виде интегрированного набора элементов, направленных на достижение определенных целей. Целостность решений достигается за счет применения единых методов как на этапе проектирования, так и при эксплуатации и сопровождении систем.

Командно-измерительная система является одной из ключевых подсистем космического аппарата, сбои в ее работе приводят к потере управления и, как следствие, к гибели всего космического аппарата, что делает актуальным применение методов моделирования на начальных этапах жизненного цикла, связанных с проектированием и обоснованием проектных решений.

Для определения задач моделирования на этапах проектирования командно-измерительной системы рассмотрим ее основные функции:

1. Прием от наземного комплекса управления командной информации и ее обработка. На этапе обработки осуществляется выделение из состава командной информации разовых команд и передача их на исполнение в блок управления бортовым комплексом, а также выделение массивов командно-программной информации и передача их в бортовой вычислительный комплекс.

2. Прием от бортовой аппаратуры телесигнализации телеметрической информации, формирование пакета телеметрии с последующей выдачей его в наземный комплекс управления.
3. Прием и ретрансляция на наземный комплекс управления сигналов измерения текущих навигационных параметров [1; 2].

Командно-измерительная система представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из нескольких обособленных подсистем и коммутационных связей между ними. На этапе проектирования решаются задачи интеграции бортовых систем на информационном уровне и интеграция подсистем командно-измерительной системы в единый функциональный комплекс.

В основе функционирования командно-измерительной системы лежат алгоритмы информационного взаимодействия между ее подсистемами, бортовыми системами и наземным комплексом управления. Для описания и анализа указанных алгоритмов необходимы программные средства, которые позволят формализовать методы приема и передачи данных и выполнять их имитационное моделирование. Для построения имитационной модели необходимо выделить параметры жизнедеятельности и формализовать способы функционирования командно-измерительной системы с точки зрения особенностей решаемой задачи моделирования [5]. Построенная модель может заменять реальную систему, воспроизводя ее свойства и характеристики. Объект моделирования представляется множеством логических и количественных характеристик, которые подвергаются обработке и изменениям для определения реакции системы [6].

В процессе функционирования командно-измерительная система осуществляет информационное взаимодействие с другими подсистемами посредством специальных структур данных: массивов командно-программной информации, разовых команд и телеметрических пакетов данных. Структуры данных и состав информации регламентируются международными и отраслевыми стандартами и различаются для разных реализаций командно-измерительной системы. Для построения модели необходимо иметь возможность задавать варианты реализации информационного взаимодействия, используя реальные стандарты предметной области.

Процессы функционирования командно-измерительной системы характеризуются быстрыми временными переходами между различными состояниями, и для их анализа при проведении имитационных экспериментов необходимо иметь возможность управления модельным временем.

Для решения этих задач необходимы удобные и наглядные инструменты имитационного моделирования, которые позволят моделировать структуру командно-измерительной системы, задавать различные варианты логики ее функционирования, оперировать специализированными типами данных и проводить имитационные эксперименты. Эти инструменты должны предоставлять возможность специалистам предметной области в удобной форме решать конструкторские задачи.

Такие же подходы и инструменты имитационного моделирования должны применяться на более поздних этапах жизненного цикла разработки командно-измерительных систем. В этом случае актуально применение моделирования для поддержки задач подготовки и проведения испытаний, обучения специалистов космической отрасли работе с оборудованием, сопровождения эксплуатации командно-измерительных систем. Программные инструменты, реализующие задачи моделирования, должны иметь возможность тесной интеграции с программным обеспечением, предназначенным для проведения испытаний и эксплуатации командно-измерительной системы.

На основе анализа задач моделирования командно-измерительной системы и рассмотрения роли имитационных экспериментов в жизненном цикле космических разработок сформулированы функциональные требования к технологическим и программным решениям:

- возможность графического построения структуры модели, отражающей структуру реального объекта моделирования;
- возможность моделирования логики функционирования системы;
- применение для построения модели терминов предметной области;
- возможности быстрой модификации модели системы;
- простота и наглядность методов построения модели для специалиста предметной области;

- обеспечение построения и работы модели в соответствии с международными стандартами космической отрасли;
- поддержка работы со специализированными типами данных «Пакет телеметрии» «Массив КПИ», «Разовые команды»;
- визуализация процесса моделирования на графической модели;
- управление модельным временем при имитации «быстрых» процессов;
- ведение журналов моделирования при проведении имитационных экспериментов;
- возможность применения инструментов моделирования для решения задач поддержки проведения испытаний и обучения принципам работы командно-измерительной системы.

Предложенные требования положены в основу исследования существующих инструментов моделирования и оценки их пригодности для имитации функционирования командно-измерительной системы.

Все указанные требования учитывались при создании программного комплекса, получившего название «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата» – ПММ БА КИС. Система предназначена для комплексной поддержки работы конструктора над проектом бортовой аппаратуры, проведения проверочных испытаний, а также в обучающем режиме – для решения учебно-исследовательских задач. ПММ БА КИС содержит следующий набор подсистем: подсистему информационно-графического моделирования, интеллектуальную подсистему имитационного моделирования, подсистему проведения испытаний, учебно-исследовательскую подсистему. Каждая подсистема предоставляет специализированный интерфейс, отражающий функции, соответствующие решаемым задачам.

2. Построение информационно-графической модели структуры КИС

Поддержка задач конструирования бортовой аппаратуры основывается на информационно-графическом моделировании технических устройств командно-измерительной системы космического аппарата [7]. Информационно-графическая модель представляет собой упрощенное графическое описание структуры командно-измерительной

системы, ее составных частей и их взаимных связей. Степень детализации модели определяется целью моделирования. Графическое моделирование состава и функций командно-измерительной системы позволяет выполнять конструирование и испытание конструкторских решений без построения реальных образцов оборудования.

Подсистема построения информационно-графической модели позволяет конструктору создавать собственный проект аппаратуры или строить модель на основе технических документов и спецификаций, задавать резервирование блоков, определять коммутационные интерфейсы, вводить параметры функционирования оборудования и задавать различные специфические характеристики (рис. 1).

Инструментарий построения модели позволяет строить новый проект путем выбора необходимых элементов из набора предлагаемых и «перетаскивания» их с помощью манипулятора «мышь» на специальную размеченную панель. Если в предлагаемом наборе базовых элементов нет нужного, пользователь может самостоятельно его построить на основе шаблона путем задания интерфейсов и характеристик блока. Затем задаются связи между элементами модели также с использованием манипулятора «мышь» (рис. 2).

Для упрощения работы пользователя можно строить собственную модель на основе проекта простой архитектуры КИС или выбора модели КИС с резервными блоками (рис. 3).

Для сравнения различных конфигураций командно-измерительных систем, определения состава и количества резервных комплектов в программном обеспечении выполняется расчет надежности оборудования.

Задачи, возникающие перед конструктором в процессе моделирования, могут потребовать многократного изменения графической модели, упрощения или детализации отдельных функциональных блоков. Например, для анализа прохождения информации через определенный цифровой интерфейс модель упрощается – в нее могут быть включены связи только по выбранному интерфейсу.

Информационно-графическая модель является основой для имитационного моделирования и проведения испытаний. Заданные в соответствии с технической документацией характеристики структурных элементов мо-

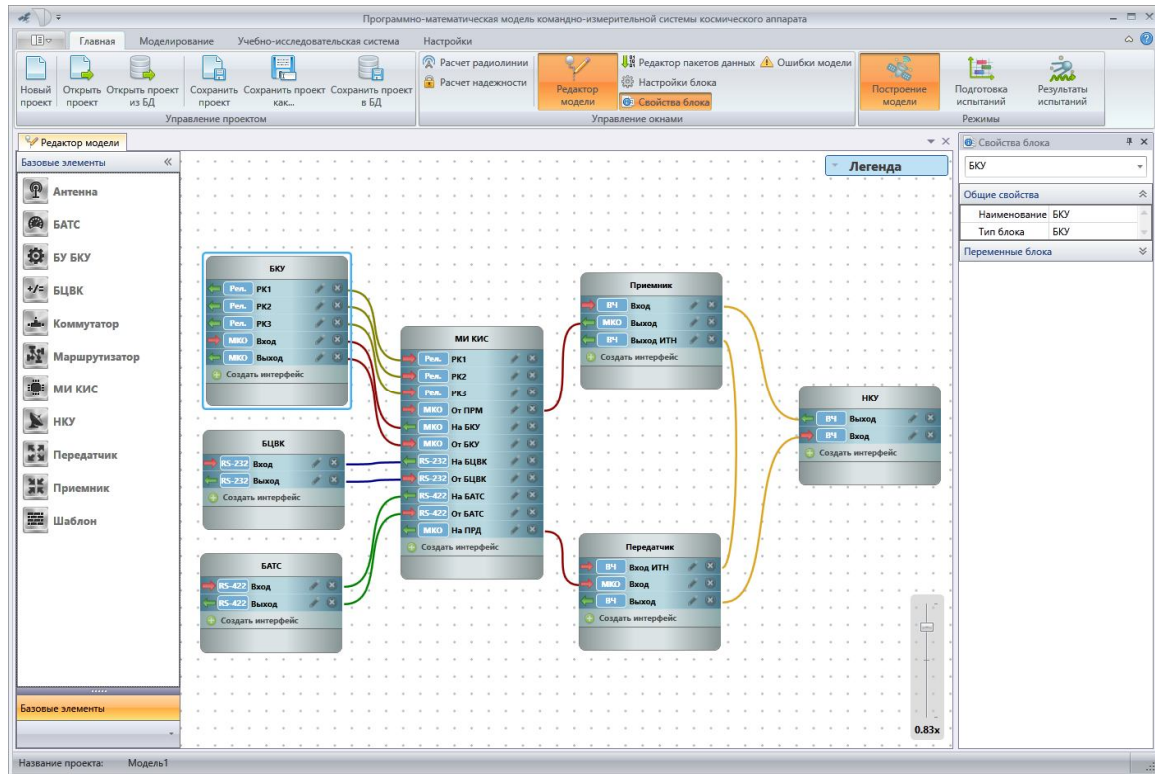


Рис. 1. Подсистема информационно-графического моделирования

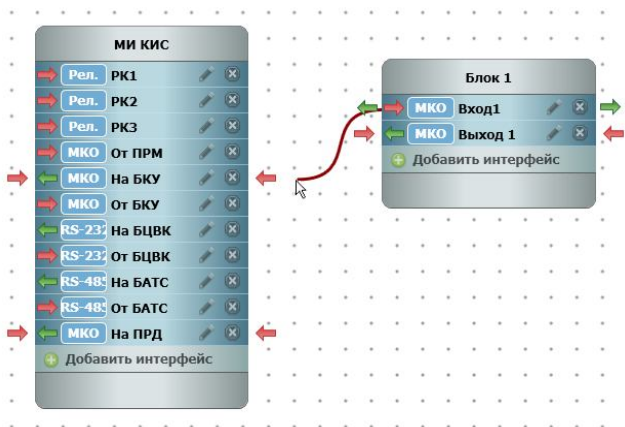


Рис. 2. Формирование конфигурации модели

дели предназначены для оценки параметров функционирования оборудования командно-измерительной системы.

3. Формирование правил функционирования модели

Редактор правил функционирования модели предназначен для создания базы знаний и позволяет в простом и наглядном виде описывать логику работы командно-измерительной системы. Для задания правил используются переменные и таймеры, которые позволяют управлять процессом моделирования.

Для переменных необходимо заполнить необходимые атрибуты: начальные значения, длину массива и прочее. Таймеры применяются для задания повторяющихся процессов, организации ожиданий или описания операций, отложенных во времени. Добавление нового таймера происходит путем создания новой записи таблицы и заполнения всех ее полей. Необходимо указать наименование таймера, признак автоматического запуска, признак циклической работы, период повторения (мс) и задержку запуска (мс).

Логика работы имитационной модели задается в форме правил. Правила представляют собой конструкции вида «Если условие то действие». Условие задает, при каких значениях переменных и таймеров необходимо выполнить действие (рис. 4). Действие задает способ изменения модели, определяя, какими должны стать значения переменных и таймеров. Условие может содержать несколько отдельных выражений, связанных логической связкой «И». Условие считается верным, если все составляющие его выражения верны. Действие может содержать нескольких действий, связанных связкой «И». Если условие правила верно, то все перечисленные действия выполняются последовательно.

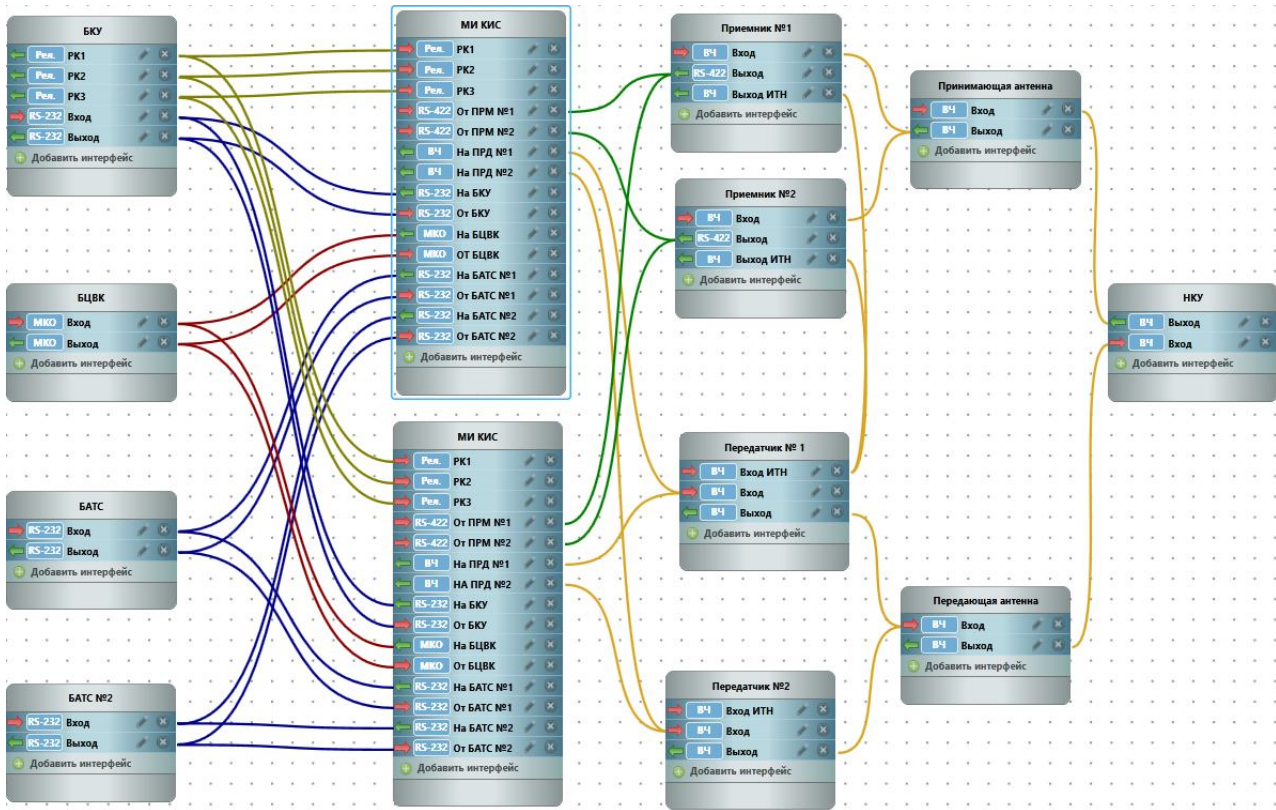


Рис. 3. Структура КИС с учетом резервирования элементов

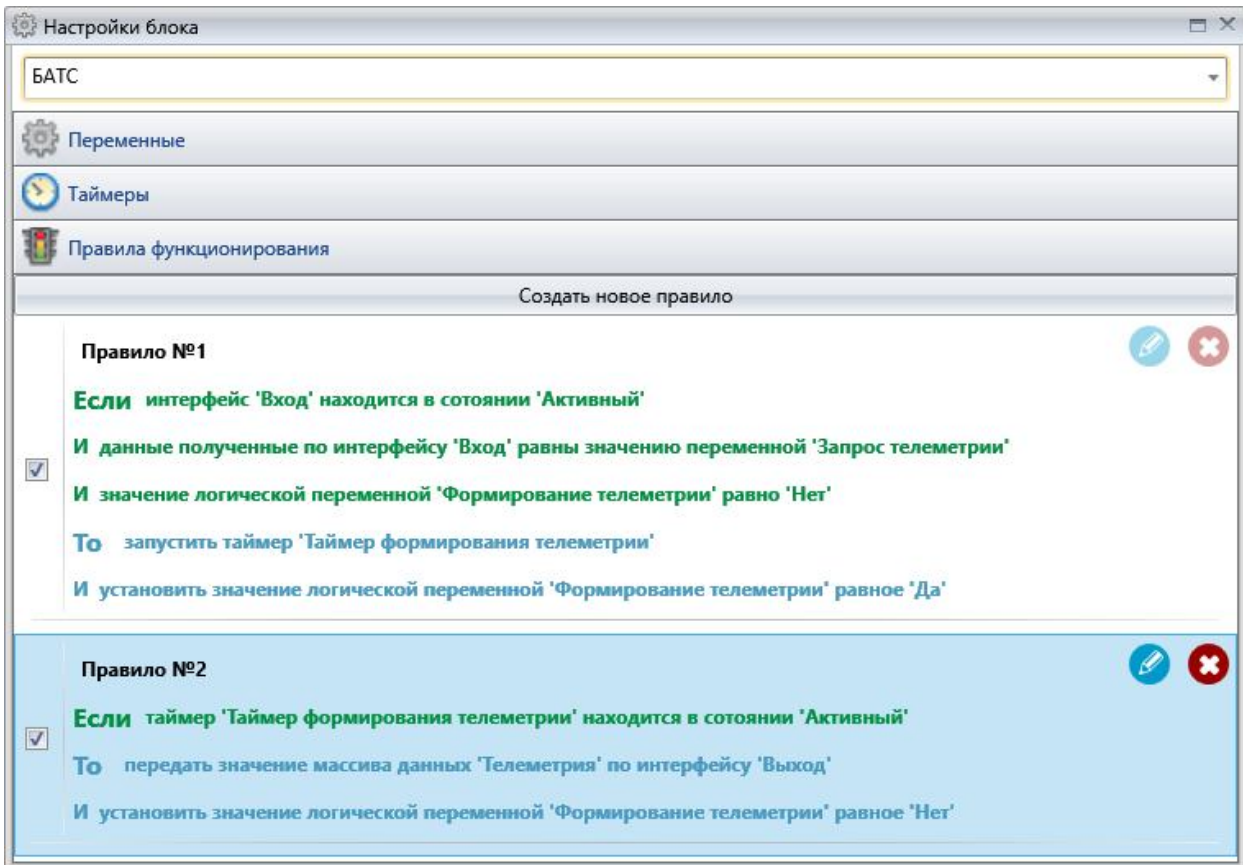


Рис. 4. Пример задания правил функционирования блока модели

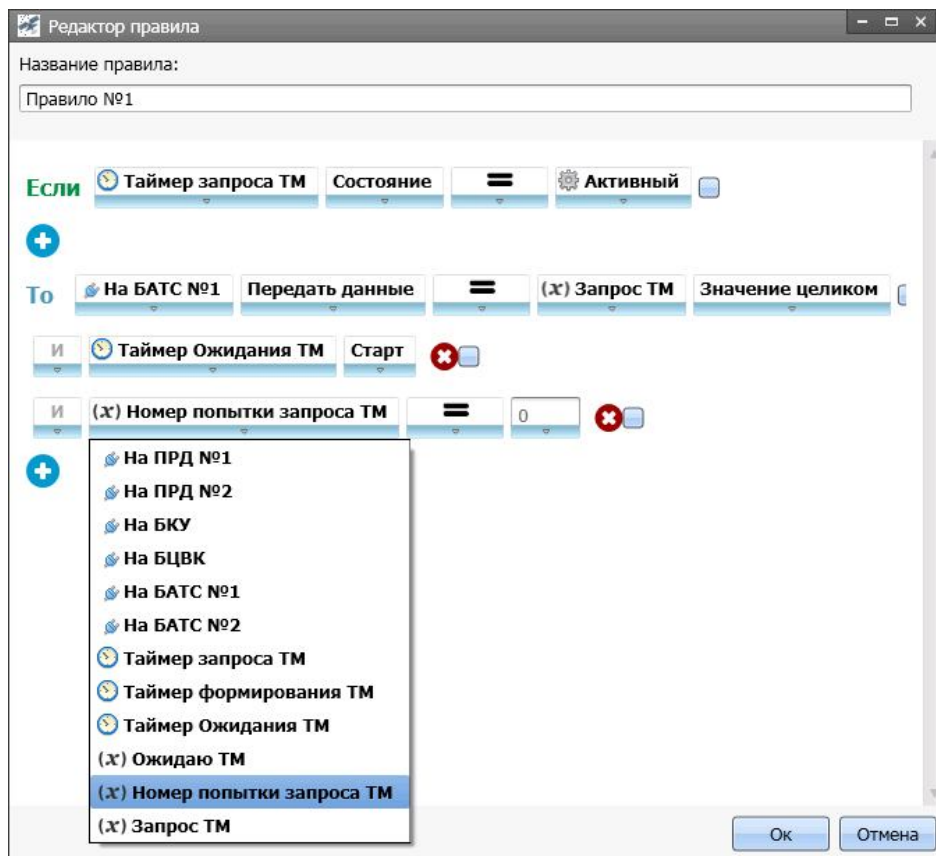


Рис. 5. Заполнение составных частей действия для блока МИ КИС

Формирование правил выполняется с помощью интеллектуального графического редактора, который автоматически отслеживает и помогает создавать синтаксически правильную структуру правила, подсказывает и предоставляет для выбора необходимые элементы. Например, при заполнении действия пользователь может выбрать: передачу данных на один из выходов блока, перевод таймера в заданное состояние, определение значения переменной (рис. 5).

Построение информационно-графической модели структуры КИС и базы правил функционирования ее элементов позволяет имитировать функционирование КИС в режиме анимации.

4. Имитационное моделирование работы КИС

Подсистема имитационного моделирования имитирует все этапы функционирования элементов командно-измерительной системы при прохождении пакетов телекоманд и телеметрии, а также реакции модели на изменения наблюдаемых параметров.

Имитационное моделирование состоит в динамической визуализации изменений состояния информационно-графической модели КИС, которые происходят согласно заданным в базе знаний правилам функционирования элементов КИС.

Процесс моделирования начинается с определения параметров запуска: «Коэффициента замедления работы модели» и «Периода дискретизации». Значения параметров заданы в системе по умолчанию и могут изменяться пользователем при необходимости.

Параметры запуска необходимы для комфортного наблюдения за событиями, происходящими при имитации работы БА КИС. Поскольку время событий и реакций в реальной бортовой аппаратуре составляет миллисекунды, то для наблюдения за ними необходимо замедлять течение модельного времени. Для задания изменений состояний модели и их визуализации применяется «Коэффициент замедления работы модели». Этот коэффициент определяет отношение между временем событий, заданных для моделирования КИС, и временем отображения этих событий в модели,

т.е. сколько миллисекунд будет проходить при моделировании 1 мс реального действия БА КИС. Например, при установке замедления, равного 25, 1 мс реальных действий будет длиться в модели 25 мс.

Кроме того, реальное время – непрерывная величина, а компьютерное моделирование может осуществляться только в дискретные моменты времени, т.е. для моделирования необходимо устанавливать моменты изменения состояния модели. Например, период дискретизации, равный 10 мс, означает, что программа будет рассматривать состояние модели каждые 10 мс и при необходимости ее изменять.

После старта имитационного моделирования программное обеспечение анализирует правила работы всех блоков модели, заданные в базе знаний. Эти правила описывают все, что происходит с моделью, и при каких условиях это происходит. Для выбора правила рассматриваются все левые части правил, в которых заданы условия их применения. Если найдено правило, для которого выполняются все условия применения, то состояние модели изменяется заданным в правиле способом.

Например, пусть функционирование модели БАТС описано в базе знаний следующими правилами.

Правило № 1

Если интерфейс «Вход» находится в состоянии «Активный»

И данные полученные по интерфейсу «Вход» равны значению переменной «Запрос телеметрии»

И значение логической переменной «Режим формирования телеметрии» равно «Нет»

То запустить таймер «Таймер формирования ТМ»

И установить значение логической переменной «Режим формирования телеметрии» равное «Да»

Правило № 2

Если таймер «Таймер формирования ТМ» находится в состоянии «Активный»

То передать значение массива данных «Телеметрия» по интерфейсу «Выход»

И установить значение логической переменной «Режим формирования ТМ» равное «Нет»

Эти правила описывают, что должен делать блок БАТС, если к нему поступил запрос телеметрии. Первое правило определяет переход в режим формирования телеметрии. Для его выполнения проверяются условия ответственности полученного запроса ожидаемому,

и если БАТС в этот момент не выполняет формирование телеметрии, то он переходит в соответствующий режим. При этом запускается таймер (значение таймера задано в модели и в данном случае равно 940 мс).

После выполнения первого правила программа выбирает новое правило. В нашем примере через 940 мс выбирается второе правило. В результате применения второго правила БАТС передает на соответствующий выход массив телеметрии и переходит в режим ожидания запроса телеметрии.

Поскольку для каждого блока модели описаны свои правила функционирования, то на каждом шаге моделирования программное обеспечение может применять несколько различных правил, меняющих состояние модели. То есть общий алгоритм работы следующий: через равные интервалы времени, заданные периодом дискретизации, программа осуществляет проверку всех условий правил функционирования для каждого из блоков КИС. В том случае, если условие одного из рассматриваемых правил блока выполняется, происходит выполнение действия, входящего в данное правило. Например, если одним из выполняющихся действий является передача данных от одного блока КИС к другому, то связывающее их соединение (указанное в правиле) становится мигающим, перекрашиваясь из цвета легенды в ярко-желтый цвет и обратно (рис. 6).

Визуализация процедуры передачи данных по заданному соединению выполняется в течение всего периода выполнения. В режиме моделирования в левой нижней части редактора модели находится таймер, отображающий время с начала запуска моделирования с учетом коэффициента замедления работы модели.

Для каждого элемента модели может быть задан набор переменных, которые будут изменяться в процессе моделирования. Изменение значений переменных выполняется программой автоматически при выполнении правил функционирования модели. Пользователь может самостоятельно менять значения, тем самым в интерактивном режиме определяя различные модельные ситуации.

Имитационное моделирование может выполняться автоматически либо по шагам. При пошаговом моделировании время шага равно периоду дискретизации, заданному при старте моделирования. После выполнения каждого шага модель останавливается

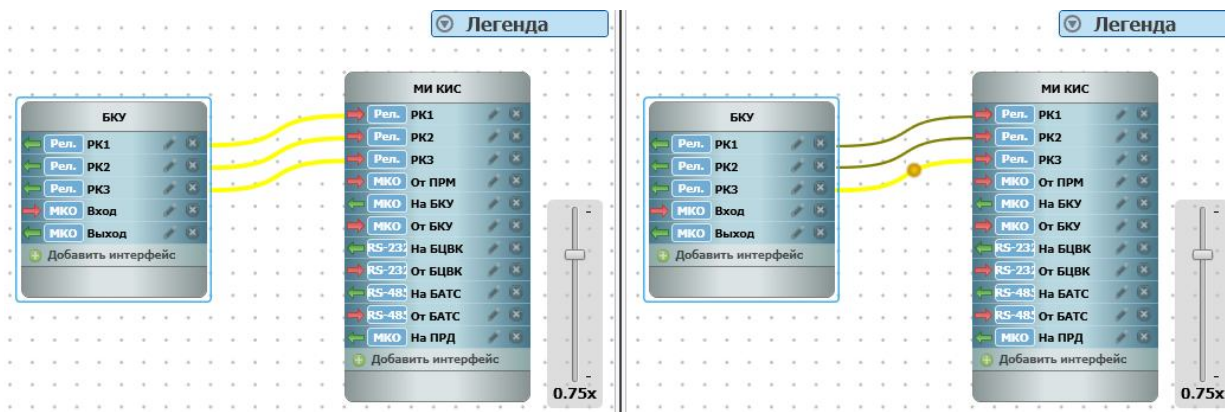


Рис. 6. Визуализация имитационного моделирования

Время начала передачи	Продолжительность пер...	Передающий интерфейс	Принимающий интерфейс
Передающий блок: БУ БКУ			
Принимающий блок: МИ КИС №1			
00:00:00.1000000	50	KY1 (Rel.)	KY1 (Rel.)
00:00:00.2500000	50	KY2 (Rel.)	KY2 (Rel.)
00:00:00.5000000	50	KY3 (Rel.)	KY3 (Rel.)
Длительность (мс): 50			
Напряжение (В): 12			
Принимающий блок: МИ КИС №2			
00:00:00.1000000	50	KY1 (Rel.)	KY1 (Rel.)
00:00:00.2500000	50	KY2 (Rel.)	KY2 (Rel.)
00:00:00.5000000	50	KY3 (Rel.)	KY3 (Rel.)
Передающий блок: МИ КИС №2			

Рис. 7. Протокол моделирования

и визуализирует тот процесс, который выполнялся на последнем шаге, например, отображает анимацию активной связи и передачу по ней данных. ПММ осуществляет проверку всех условий правил функционирования для блоков КИС на каждом шаге и активизирует необходимые действия с визуализацией на схеме модели. Остановка имитационного моделирования выполняется по требованию пользователя.

В процессе имитационного моделирования программное обеспечение формирует протокол. В этот протокол входят все передаваемые пакеты данных с привязкой ко времени (рис. 7).

Программное обеспечение позволяет группировать данные в протоколе. Например, на рисунке показана группировка по передающему блоку, а внутри нее – по принимающему. Внутри группировки отображаются строки с данными моделирования. По результатам моделирования формируется отчет.

5. Применение имитационной модели

Применение имитационного моделирования структуры и функционирования командно-измерительной системы расширяет возможности проведения экспериментальных исследований за счет наглядного визуального

представления и анализа процесса функционирования модели. Использование имитационной модели позволяет не только апробировать конкретные проектные решения на создание командно-измерительной системы заданного назначения. Преимущества заключаются еще и в возможности систематизации и накопления проектных решений для последующего их использования.

В созданных технологических и программных решениях объединены информационные, имитационные, измерительные и вычислительные функции. Поддержка взаимодействия с контрольно-проверочной аппаратурой позволяет выполнять анализ параметров функционирования оборудования и его соответствия техническим требованиям. Программное обеспечение проводит проверку корректности испытаний в соответствии с техническими параметрами оборудования, заданными в информационно-графической модели. Функции анализа измерений обеспечивают визуализацию результатов в графической и табличной форме, формирование реакций на выход за граничные условия, генерацию отчетов и рекомендаций по результатам проведенных испытаний.

В основе учебно-исследовательской системы также лежит имитационное моделирование, позволяющее наглядно продемонстрировать различные особенности функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. Режим моделирования может использоваться в качестве тренажера для задания учебно-тренировочных сценариев. Благодаря моделированию поддерживаются учебно-исследовательские функции [13], обеспечивающие базовую подготовку, выработку умений решения типовых задач, формирования навыков работы с оборудованием, а также действий в нестандартных ситуациях, развитие способностей к проектированию, исследованию и анализу функционирования оборудования, проведение модельных экспериментов.

Итак, программный комплекс «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы», предназначенный для автоматизированной поддержки различных этапов конструирования бортовой аппаратуры, позволяет выполнять информационно-графическое моделирование архитектуры, а также наглядное имита-

ционное моделирование функционирования командно-измерительной системы в соответствии с назначением и условиями работы реального оборудования.

Применение ПММ БА КИС расширяет возможности проведения экспериментальных исследований за счет наглядного визуального представления и анализа процесса функционирования модели командно-измерительной системы. Поддержка взаимодействия с контрольно-проверочной аппаратурой позволяет выполнять анализ параметров функционирования оборудования и его соответствия техническим требованиям. Учебно-исследовательские функции ПММ БА КИС обеспечивают возможность повышения квалификации персонала, занятого в отрасли.

Использование имитационной модели позволяет апробировать конкретные проектные решения на создание командно-измерительной системы заданного назначения. Это сокращает время разработки и повышает качество технических проектов. Преимущества заключаются также в возможности систематизации и накопления проектных решений для последующего их использования. Все это открывает хорошие перспективы повышения эффективности производства командно-измерительных систем.

Библиографические ссылки

1. Микрин Е. А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 336 с.
2. Системы и комплексы космические. Термины и определения. ГОСТ Р 53802-2010. М. : Стандартинформ, 2011. 28 с.
3. Space engineering. System engineering general requirements ECSS-E-ST-10C. ESTEC, 2009. 100 p.
4. Space engineering. System modelling and simulation ECSS-E-TM-10-21A. ESTEC, 2009. 111 p.
5. Антонов А.В. Системный анализ : учебник для вузов. 3-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2008. 454 с.
6. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. СПб. : Питер, 2004. 847 с.
7. Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата – ПММ БА КИС : руководство оператора. Красноярск : ИВМ СО РАН, 2015. 176 с.

Статья поступила в редакцию
26.10.2015 г.