

## Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата

Л. Ф. Ноженкова\*, О. С. Исаева, Е. А. Грузенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

\*Контактный e-mail: expert@icm.krasn.ru

Рассмотрен метод системного моделирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Дано описание модели и эвристического метода направленного пошагового проектирования, в результате которого строится модель, имитирующая структуру, свойства и методы функционирования командно-измерительной системы. Описана программная реализация инструментальных средств, позволяющих выполнять построение модели: задавать конфигурацию, коммутационные соединения и логику информационного взаимодействия. Исследования проводятся в рамках создания программного обеспечения для поддержки конструирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата.

*Ключевые слова:* космический аппарат, командно-измерительная система, поддержка конструирования бортовой аппаратуры, имитационное моделирование, эвристический метод, пошаговое проектирование.

### Введение

В современном мире технологии системного анализа и методы компьютерного моделирования становятся неотъемлемой частью научно-технической деятельности. Наблюдается устойчивая тенденция к осознанию системного подхода как стандартного процесса, который можно реализовать применительно к любому объекту исследования [1]. Отраслевые стандарты определяют системную разработку как междисциплинарный подход, управляющий всеми работами по преобразованию технических требований в системные решения [2]. Системное моделирование является основой исследования сложных технических систем.

В работе рассматривается системный подход к построению модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Командно-измерительная система представляет собой сложный технический объект, основу которого составляют высокотехнологичные элементы и программное обеспечение [3]. Проведение экспериментальных исследований бортовых систем космического аппарата связано с экономическими и технологическими трудностями, вызванными сложностью и разнообразием их функций и назначения. В зависимости от целей создания и условий эксплуатации различные командно-измерительные системы имеют уникальные характеристики и собственную логику функционирования. Отсутствие технических описаний подобных решений на начальном этапе конструирования приводит к невозможности построения

аналитических моделей. Программная поддержка конструкторских задач заключается в моделировании бортовой аппаратуры в соответствии с декларативным описанием функций и характеристик бортовых систем, а также правил их взаимодействия с внешней средой.

В работе рассмотрен пошаговый метод построения модели [4, 5]: на первом шаге строится модель, отображающая лишь некоторые функции исходного объекта, далее выполняется постепенное ее приведение к состоянию, подобному системе-оригиналу в соответствии с заданными целями моделирования. Построение модели требует решения задачи выбора способа изменения ее возможных состояний. Оценкой полученной модели являются критерии адекватности и эффективности. В системном анализе эти критерии оценки модели определяются ее пригодностью для достижения поставленных целей и устанавливаются эмпирически пользователем модели. Например, по аналогии с оценкой эффективности программного обеспечения [4] рассматриваются временные и ресурсные параметры (ISO 9126). Для поддержки задачи достижения необходимых характеристик модели требуется предложить конструктору, участвующему в ее создании, способы и программные инструменты количественной и качественной оценки ее адекватности и эффективности. Конструктор должен иметь возможность в процессе исследования изменять структуру и методы функционирования, выполняя детализацию, упрощение или разбиение модели на отдельные части. В этой связи остается нерешенным вопрос о сокращении количества допустимых вариантов изменений и поддержке целенаправленного выбора модификации модели. Для решения этой задачи разработан эвристический метод построения модели на основе дерева допустимых изменений. Метод является частью работ по комплексной инструментальной поддержке конструирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата.

## 1. Описание объекта моделирования

Бортовая аппаратура командно-измерительной системы предназначена 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 [6]. Поддержка решения конструкторских задач включает стадии проектирования бортовой аппаратуры, определения ключевых принципов функционирования командно-измерительных систем, моделирования и анализа работы оборудования, подготовки отчетных документов и проч. Моделирование командно-измерительной системы заключается в задании структуры модели и методов ее функционирования. Структура модели командно-измерительной системы представляет собой определенную конфигурацию функциональных блоков, интерфейсов и коммутационных связей.

Пример графического представления конфигурации модели командно-измерительной системы показан на рис. 1. Здесь представлены блоки модели, описывающие возможности внутрисистемного информационного обмена: приемник (ПРМ), передатчик (ПРД), интерфейсный модуль командно-измерительной системы (МИ КИС). Стрелками показаны направления взаимодействия блоков по заданным коммутационным интерфейсам. Внешнее взаимодействие командно-измерительной системы моделируется с помощью блоков бортовых систем космического аппарата (БОРТ) и наземного комплекса управления (ЦУП). В состав блока бортовых систем входят: бортовой цифровой

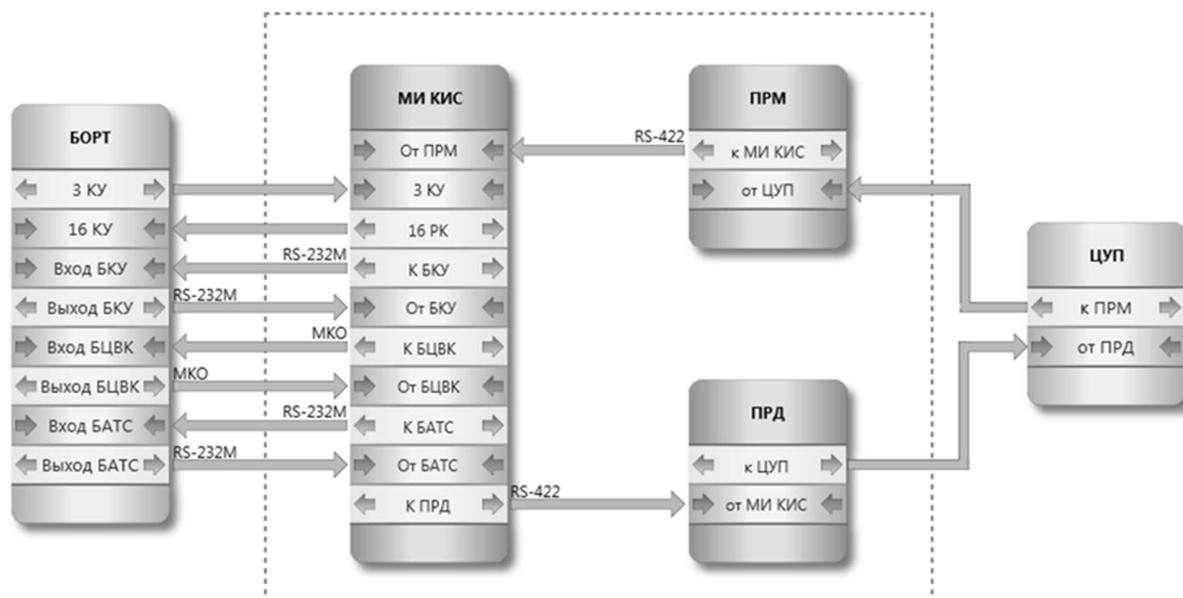


Рис. 1. Пример модели командно-измерительной системы

вычислительный комплекс (БЦВК), бортовой комплекс управления (БКУ) и бортовая аппаратура телесигнализации (БАТС). Для расширения возможностей графического моделирования в модель могут входить дополнительные или резервные элементы.

Помимо создания конфигурации командно-измерительной системы необходимо задавать ее функционирование, которое определяется через взаимодействие систем космического аппарата с наземным комплексом управления. Такое взаимодействие осуществляется с помощью двух типов данных: телекоманд и телеметрии. Для моделирования рассматриваются стандарты европейского космического агентства, которые регламентируют состав и способ передачи данных. Стандарт ESAPSS-04-107 [7] предназначен для передачи телекоманд, а стандарт ESAPSS-04-106 [8] — для телеметрии. Телекоманды передаются из центра управления полетами на борт космического аппарата. Приемник принимает пакеты команд и передает их в интерфейсный модуль командно-измерительной системы, который, в свою очередь, обрабатывает команды и в зависимости от назначения каждой из них вырабатывает соответствующую реакцию. Телеметрия представляет собой поток данных, передаваемый с борта космического аппарата на землю. Интерфейсный модуль командно-измерительной системы с заданной периодичностью отправляет запрос бортовой аппаратуре телесигнализации для получения телеметрической информации. Бортовая аппаратура телесигнализации обрабатывает запрос и возвращает пакет, содержащий телеметрию борта, которая дополняется телеметрией от командно-измерительной системы и собирается в телеметрический пакет в соответствии со стандартом ESAPSS-04-106. Построенная телеметрия возвращается передатчиком в наземный комплекс управления.

В зависимости от назначения командно-измерительной системы различается набор команд управления и функций, который необходимо учитывать при создании модели. Цели моделирования определяют состав элементов, структуру модели, значимые признаки, характеристики, коммутационные связи, направления потоков данных и способы функционирования. Например, для моделирования передачи данных по определенному цифровому интерфейсу требуется рассматривать коммутационные связи, соответ-

ствующие выбранному типу интерфейса. Для решения задач, возникающих перед конструктором в процессе моделирования, требуется детализация либо упрощение модели в целом или отдельных функциональных блоков.

## 2. Постановка задачи системного моделирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы

Модель командно-измерительной системы космического аппарата должна отображать существенные стороны объекта-оригинала, рассматривая конечное число отношений элементов, но вместе с этим содержать достаточный объем информации для реализации целей ее построения. Для моделирования будем применять имитационный подход [9, 10]. Формализация модели выполняется на основе метода системного моделирования [4], который заключается в построении системы  $S$ , представляющей собой образ исходной системы  $S^0$  при моделирующем отображении  $f : S = f(S^0)_V$ . Функция  $f$  задает отображение системы  $S^0$  в модель в соответствии с целевым назначением  $V$ . Моделирующее отображение  $f$  представляется в виде композиции двух отображений — огрубляющего  $q$  и гомоморфного  $r$ , т. е.  $q(S^0) = S^1$ ,  $r(S^1) = S$ ,  $r(q(S^0))_V = S$ , где  $S^1$  — модель  $S^0$ . Таким образом, исходная система представляет собой, с одной стороны, упрощенный образ оригинала, а с другой — точно передает состояние и функции исходной системы в рамках свойств и характеристик, необходимых для удовлетворения целей ее построения.

Модель командно-измерительной системы задается множествами блоков, их состояний и методов функционирования:  $S = \langle G, I, P \rangle$ , где  $G$  — множество элементов структуры системы (приемник, передатчик, бортовые системы и др.),  $I$  — множество параметров,  $P$  — методы функционирования. Множество методов функционирования предназначено для моделирования работы командно-измерительной системы и определяет правила изменения состояния модели в определенные моменты времени.  $P(X, W, T) = Y$ , где  $X, W, Y \subseteq I$ . Здесь  $X$  — множество входных воздействий (команды, импульсы, сигналы, запросы);  $W$  — множество воздействий внешней среды (изменение параметров функционирования, моделирование нештатных ситуаций);  $Y$  — множество наблюдаемых параметров;  $T$  — моменты времени наблюдения.

Моделирующее отображение  $q$  предназначено для построения множеств  $G$  и  $I$ . Оно выполняет упрощение системы  $S^0$  путем исключения компонентов структуры и коммутационных связей, сохраняя свойства модели  $S^1$  в объеме, достаточном для описания системы в соответствии с ее целевым назначением. Гомоморфное отображение  $r$ , применяемое к упрощенной структуре  $S^1$ , предназначено для описания правил работы модели (множество  $P$ ). Отображение  $r$  определяет способы имитационного моделирования функций исходной системы с учетом входных переменных и внешних воздействий для получения выходных параметров. Результатом применения отображений является система  $S$ , которая обобщает или агрегирует систему  $S^0$ , но вместе с тем верно отражает функционирование системы-оригинала. В зависимости от характера обобщения и степени агрегирования для одного и того же оригинала можно получить несколько различных реализаций модели. Суть построения модели сводится к созданию упрощенной структуры, свойства и поведение которой соответствуют оригиналу.

Технология системного моделирования предлагает использовать методы представления знаний для описания различных аспектов предметной области, наблюдаемых

фактов и закономерностей. Для задания методов функционирования модели применяется продукционный подход. База знаний состоит из правил, представляющих собой символическую конструкцию вида: “Если  $A$  то  $B$ ”. Левая часть правила задает условие его выполнения, а правая часть — действия, осуществляющие изменение состояния модели. Выделяются правила общего назначения, правила работы элементов модели, выдачи командной и командно-программной информации на системы космического аппарата, приема и выдачи телеметрической информации, правила управления по командам, контроля состояния бортовой аппаратуры, задания режимов и интерфейсов для работы оборудования и проч. Например, правило выбора скорости формирования телеметрической информации (ТМИ) в основном комплекте интерфейсного модуля командно-измерительной системы (МИ КИС) имеет вид

Если Команда = K1N

или Команда = Рестарт

То Комплект МИ КИС = Основной

и Скорость формирования ТМИ = 1000 бит/с.

Применяемая структура знаний облегчает их интерпретацию и позволяет в естественном виде манипулировать графическими блоками модели командно-измерительной системы и их информационными характеристиками. Для оценки модели введем критерии адекватности и эффективности, определяющие близость характеристик построенной модели  $S$  и ожидаемого исследователем решения. Адекватность  $A(S)$  представляет собой оценку конфигурации модели (преобразования  $q$ :  $A(S) = A(q(S^0))$ ). Эффективность определяется по соответствию методов работы модели целям моделирования и представляет собой эвристическую функцию, выраженную в виде количественных или качественных (экспертных) оценок. Эффективность можно рассматривать как оценку выполненного отображения  $r$ , определяющего способы работы модели:  $E(S) = E(r(S^0))$ .

### 3. Алгоритм построения модели командно-измерительной системы

Алгоритм построения модели командно-измерительной системы (рис. 2) предназначен для задания последовательности действий по преобразованию модели  $S^1$  в модель  $S$ , подобную системе-оригиналу  $S^0$  в соответствии с целевым назначением  $V$ . Алгоритм выполняется по шагам.

*Шаг 1.* Построение концептуального описания модели. Сбор и консолидация исходной информации о назначении, характеристиках, условиях и способах работы моделируемой командно-измерительной системы.

*Шаг 2.* Выбор критериев для оценки модели. Способы оценки зависят от целевого назначения системы. Например, адекватность может определяться сравнением конфигурации модели и реальной системы, но с учетом требований ее наглядности и в этом случае задаваться линейной функцией от структуры модели, выраженной в виде  $A(S) = aN_a + bN_b + cN_c$ , где коэффициенты  $a, b, c \leq 1$ ;  $N_a$  — количество элементов модели  $S$ ;  $N_b$  — количество интерфейсов;  $N_c$  — количество коммутационных связей. Эффективность модели позволяет судить о достижении целей моделирования и определена в виде количественных или качественных показателей. Для оценки эффективности используются следующие показатели: наглядность — количество элементов и коммута-

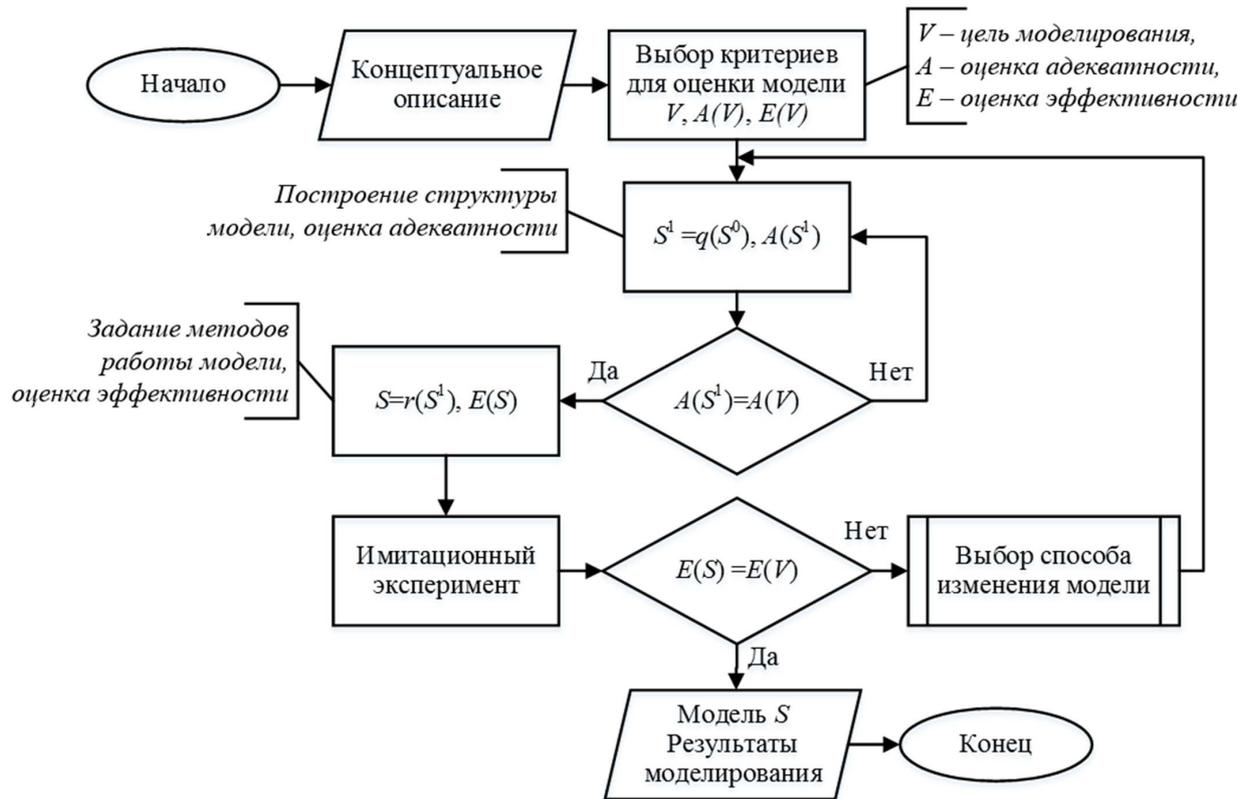


Рис. 2. Алгоритм построения модели

ционных связей; управляемость — возможность задавать нужные параметры; работоспособность — количество выполняемых действий в единицу времени; время реакции — среднее время прохождения команд, телеметрии; запаздывание — максимальное и минимальное время задержки передачи данных; длина пути — максимальная длина пути для передачи данных; целостность — количество различных маршрутов, описывающих передачу данных от входа к выходу; потери данных — процент потерь данных при взаимодействии; отказоустойчивость — количество ошибок модели в нештатных ситуациях; надежность — оценка надежности структуры (допустимые границы) и др.

*Шаг 3.* Построение структуры модели. Модель построена в начальном приближении, выполнено упрощение структуры, определены значимые элементы и коммутационные связи, основные параметры. На данном шаге выполнена оценка адекватности построенной структуры модели целям, для которых она создается.

*Шаг 4.* Задание методов работы модели. Формируется база знаний, описывающая логику поведения отдельных элементов модели и системы в целом.

*Шаг 5.* Имитационный эксперимент. На данном шаге выполнено моделирование, изменение параметров функционирования модели, задание нештатных ситуаций и проч. Анализ результатов моделирования, расчет или экспертная оценка эффективности модели.

*Шаг 6.* Выбор способа изменения модели. Если по результатам исследования принято решение о необходимости внесения изменений в информационно-графическую модель или базу знаний, то переходим к алгоритму, реализующему эвристический метод выбора способа изменения модели. Пусть имеется модель  $S^1$ , каждое изменение модели обозначим через  $S^i (i = 2, \dots, n)$ . Требуется найти модель  $S^n$ , обладающую заданными

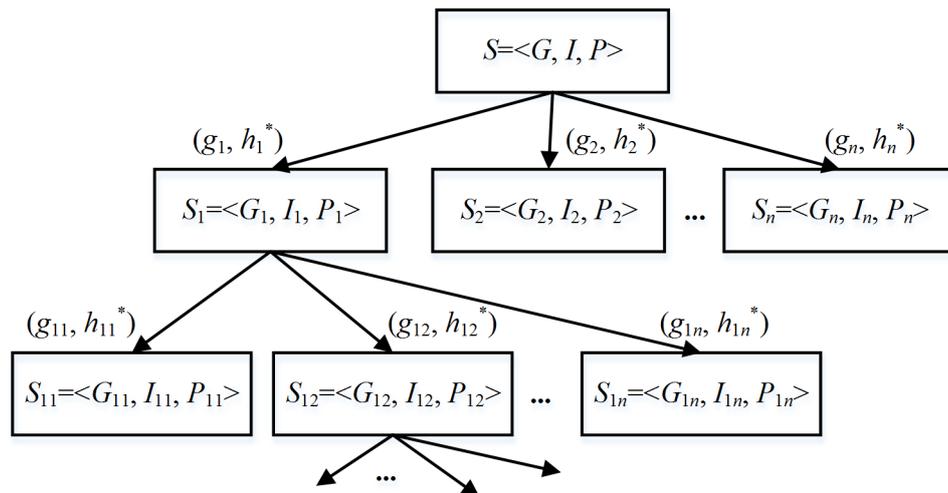


Рис. 3. Дерево допустимых изменений модели

свойствами и удовлетворяющую целям моделирования. Для выбора варианта изменения модели применяется дерево допустимых изменений, определяющее переходы от текущего состояния модели к последующим (рис. 3).

Первый уровень дерева содержит изменения элементов структуры модели и методов их функционирования на один шаг. Каждое последующее преобразование отображается отдельной ветвью. Охватить весь диапазон преобразований и построить полное дерево изменений не представляется возможным. Для сокращения дерева изменений и выбора наилучшего варианта модели разработан эвристический метод, основанный на алгоритме  $A^*$  [11]. Введем эвристическую функцию оценки узлов в дереве изменений:  $f(S^i) = g(S^i) + h^*(S^i)$ . Здесь  $g(S^i)$  — стоимость наилучшего пути от  $S^1$  к  $S^i$ ,  $h^*(S^i)$  — предполагаемая стоимость предстоящего пути к целевому состоянию модели  $S^n$  — определяется как степень близости модели  $S^i$  к  $S^n$ . Функция  $g$  имеет вид  $g(S^i) = A(S^i)/A(V)$ , где  $A$  — оценка адекватности, выбранная на начальном этапе построения модели. Эвристическая функция  $h^*$  задается в виде  $h^*(S^i) = E(S^i)/E(V)$ , где  $E$  — оценка эффективности модели. Показатель эффективности модели строится на основе одного или нескольких критериев, вносящих равнозначный вклад в общее решение.

Для выбора способа изменения модели в дереве требуется выбрать узел, имеющий лучшие оценки. Для этого дерево строится на несколько уровней в глубину, рассчитывается оценочная функция каждого уровня, выбирается узел с лучшей оценкой и выполняется изменение модели. Дополнительно может применяться стратегия поиска в глубину на несколько шагов и выбора из построенного поддерева лучшей оценки.

Алгоритм выполняется до тех пор, пока не достигнуты характеристики модели, соответствующие заданным конструктором целям моделирования или не будут выполнены все допустимые варианты изменения модели.

Построенная таким образом модель командно-измерительной системы может лишь асимптотически приближаться к оригиналу, но за счет упрощения структуры позволяет повысить наглядность и качество полученного решения и в каждом практическом случае выполнять моделирование с заданной степенью детализации.

#### 4. Программное обеспечение для моделирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы

Для решения задач информационно-графического и имитационного моделирования разработано программное обеспечение [12], которое включает инструментальные средства построения модели, интеллектуальную подсистему имитационного моделирования, подсистемы визуализации и обработки результатов моделирования (рис. 4). Создание конфигурации и описание характеристик командно-измерительной системы выполняются в подсистеме графического сопровождения прикладных задач (рис. 5). Разработана библиотека графических элементов, содержащая базовые описания моделей основных блоков — приемника, передатчика, интерфейсного модуля, бортового цифрового вычислительного комплекса, бортового комплекса управления, бортовой аппаратуры телесигнализации и др.

Инструменты позволяют строить произвольные модели из базовых элементов, а также задавать пользовательские представления. Построение модели заключается в визуальном размещении, настройке конфигурации блоков и задании коммутационных интерфейсов, соединений и параметров взаимодействия. Программное обеспечение помогает в выборе вариантов коммутационных соединений, визуализируя допустимые входы-выходы.

Построенная графическая модель является основой для имитационного моделирования функционирования командно-измерительной системы. Редакторы параметров и пакетов данных позволяют задавать характеристики, изменяемые в ходе имитационных экспериментов для моделирования внешних воздействий и нештатных ситуаций. Не существует однозначных и строго определенных алгоритмов функционирования бортовой аппаратуры, в разных случаях конструктору требуется рассматривать различные способы реализации ее функций. Для описания логики работы командно-измерительной системы разработана база знаний. База знаний представляет собой упорядоченные множества правил, фактов и данных. Редактор базы знаний (рис. 6) позволяет в удобном виде создавать правила, описывающие действия по изменению состояния модели при

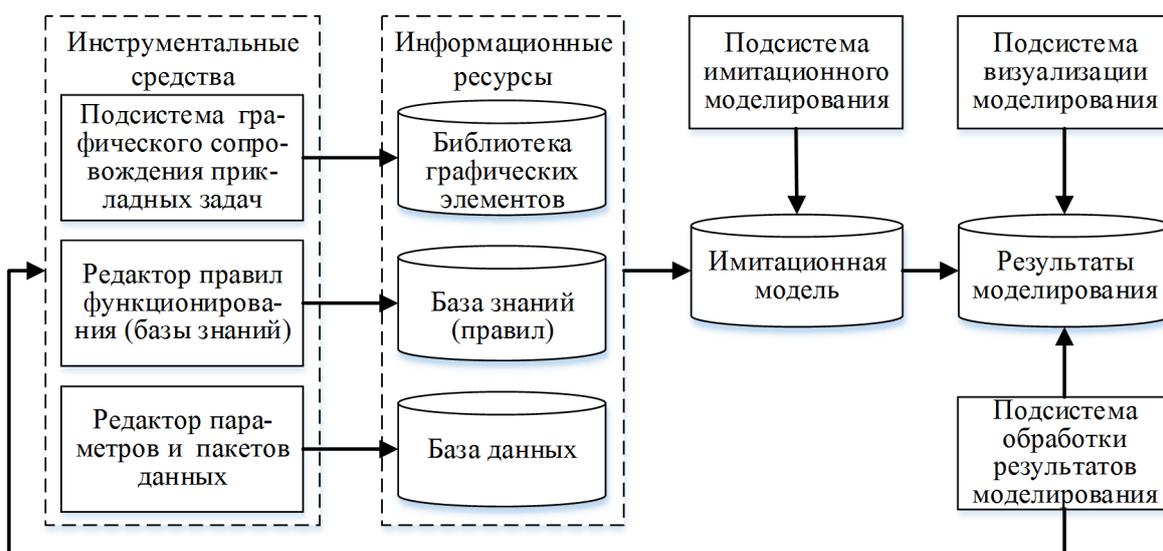


Рис. 4. Схема программных подсистем и информационных ресурсов

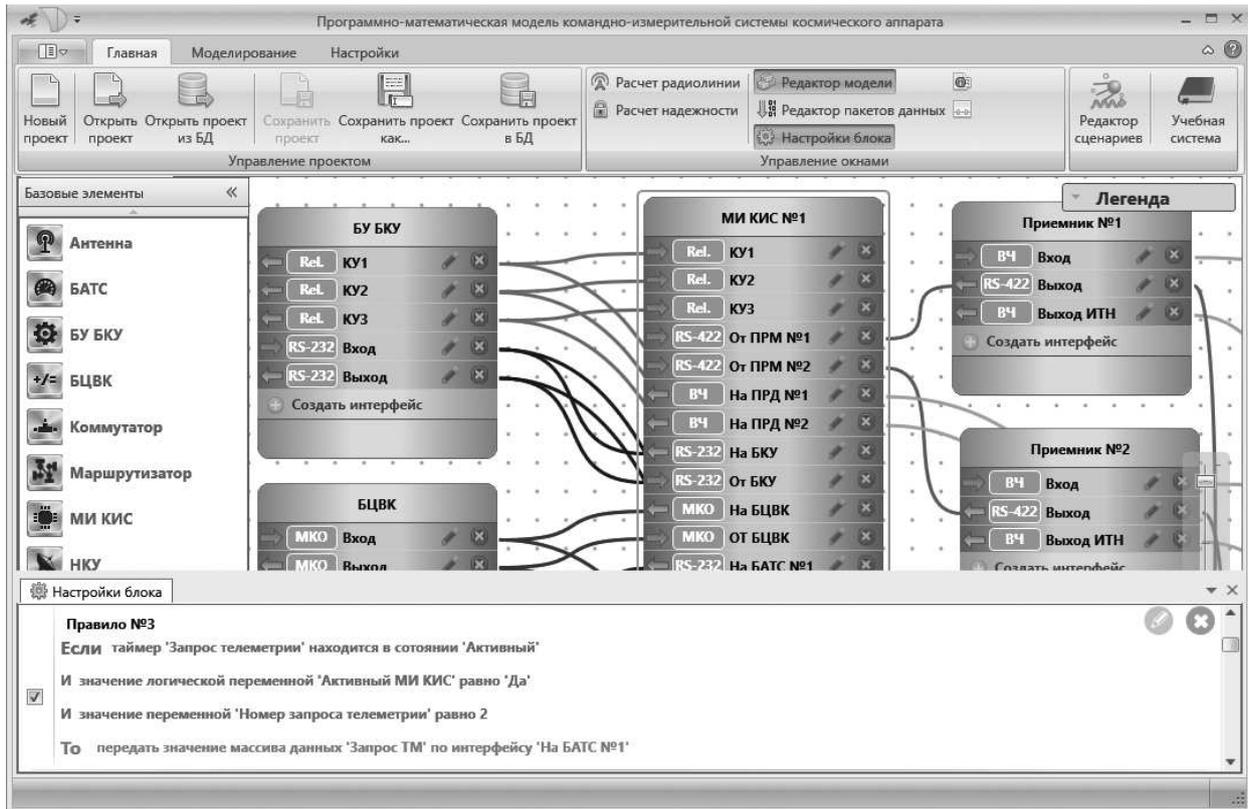


Рис. 5. Инструменты построения графической модели

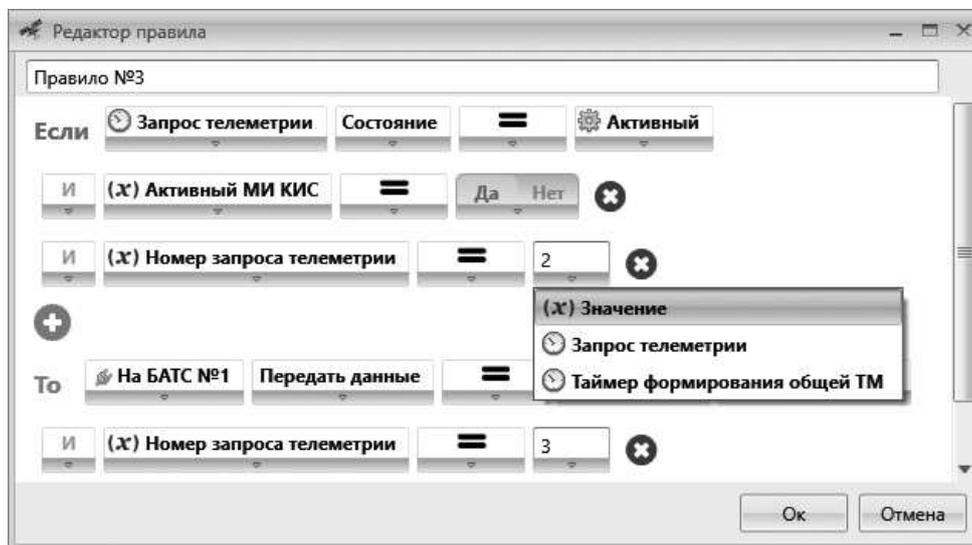


Рис. 6. Пример редактирования правила из базы знаний

выполнении заданных в правиле условий. При редактировании знаний выполняется контроль структуры правила и допустимых значений переменных.

После построения модели и задания логики ее функционирования конструктор имеет возможность выполнять имитационное моделирование. Имитация функционирования модели осуществляется путем пошагового или автоматического изменения ее со-

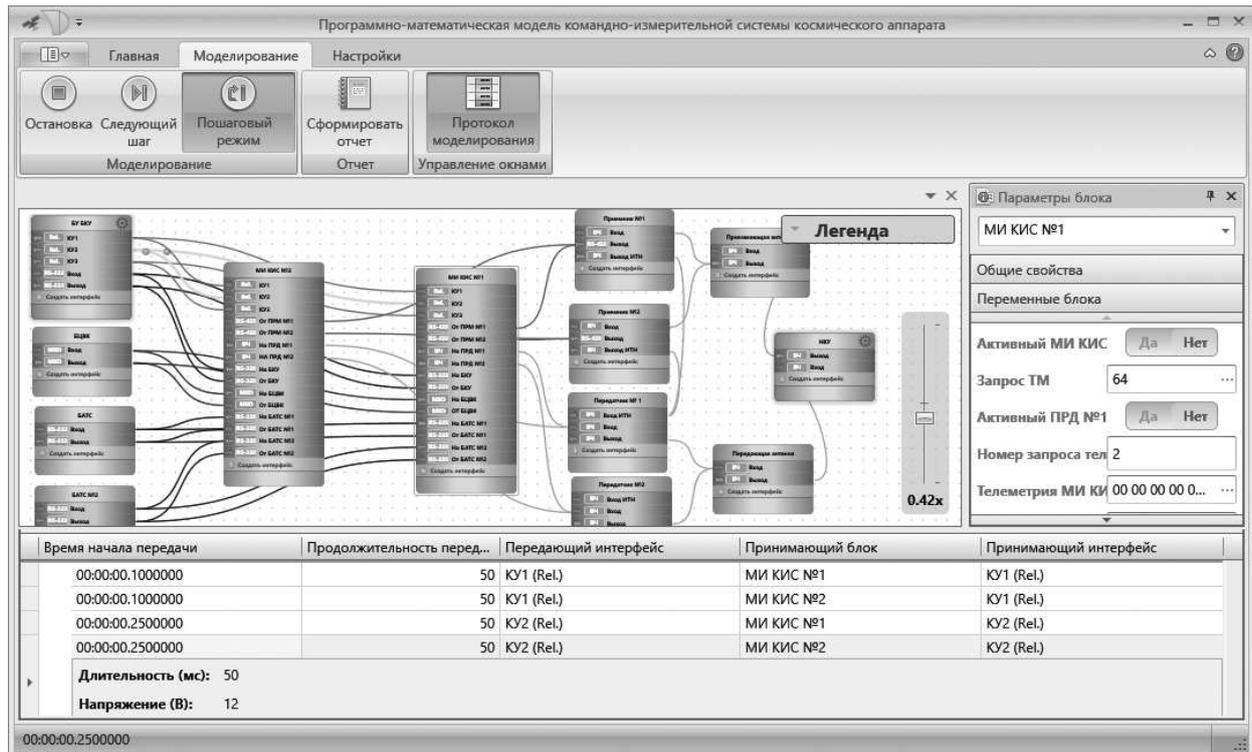


Рис. 7. Визуализация процесса имитационного моделирования

стояния в соответствии с заданными в базе знаний правилами. Для этого реализованы методы логического вывода, в процессе которого выбираются правила, применимые к текущему состоянию модели, выполняются действия и визуализируется выполнение команд, имитируются процессы формирования и передачи пакетов данных.

Визуализация моделирования выполняется на графической модели, которая динамически меняет свое состояние, отображает изменение параметров и потоков данных, каждая передача данных сопровождается анимационными эффектами (рис. 7). Конструктор может управлять процессом моделирования, рассматривая особенности функционирования как отдельных блоков, так и системы в целом, например, интерактивно изменять направления или скорость передачи данных, переключать активность элементов модели, моделировать отказ оборудования или потерю данных.

Программное обеспечение позволяет проводить многократные испытания с различными наборами входных данных и определять влияние изменяющихся условий функционирования на результаты имитационного моделирования. Все получаемые и передаваемые пакеты данных, а также изменения состояний модели фиксируются в протоколе, анализ которого позволяет делать выводы о работе модели. Протоколы представляются в табличном виде и позволяют просматривать и детализировать данные, группировать события, выделять принимающие и передающие источники данных. Они позволяют анализировать последовательность выполненных действий, объемы и состав переданных данных, следить за изменением параметров и характеристик, выявлять реакции на происходящие в модели события. Такой подход позволяет конструктору исследовать, как и почему система выполняет то или иное действие, а это, в свою очередь, ведет к пониманию, как нужно изменить модель для достижения требуемого функционирования.

## Заключение

Применение технологии системного моделирования и методов эвристического поиска позволили разработать алгоритм построения модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. Результатом работы алгоритма является модель, представляющая с заданной степенью упрощения или детализации конфигурацию и функции объекта моделирования. Алгоритм задает итерационный процесс, основанный на построении дерева допустимых изменений состояний модели. Сокращение перебора в дереве выполняется с применением эвристического алгоритма оценки состояний. Реализация методов построения модели командно-измерительной системы выполнена в виде программных инструментов информационно-графического и имитационного моделирования. Программное обеспечение содержит расширенные функции настройки модели, управления имитационными экспериментами, ведения и анализа протоколов имитационного моделирования.

В настоящий момент программный комплекс проходит апробацию и уже получил положительные отзывы со стороны организации — разработчика спутниковых систем. Анализ результатов внедрения в эксплуатацию программного обеспечения позволит разработать дополнительные критерии оценки адекватности и эффективности модели на основе выдвигаемых конструктором бортовых систем требований к свойствам и назначению модели. Дальнейшее развитие методов и программных средств построения имитационной модели предполагает ее внедрение для управления процессом испытаний и анализа функционирования реального оборудования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата в составе контрольно-проверочной аппаратуры.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (договор № 02.G25.31.0041).

## Список литературы / References

- [1] **Хорошев А.Н.** Управление решением проектных задач на предприятии // Современные научные исследования и инновации. 2011. № 7. Адрес доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2011/11/4940>.  
**Horoshev, A.N.** Management of the solution of design tasks at the enterprise // Modern Scientific Researches and Innovations. 2011. No. 7. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2011/11/4940>. (in Russ.)
- [2] Space engineering. System engineering general requirements ECSS-E-ST-10C. ESTEC, 2009. 100 p.
- [3] Разработка командно-измерительной системы для перспективных КА на базе платформы “Экспресс-4000”. Методические указания МУ-№2012/06. Железногорск, 2012.  
Development of command and measuring system for perspective spacecrafts on the basis of a platform “Express-4000”. Metodicheskie ukazaniya MU-No. 2012/06. Zheleznogorsk, 2012. (in Russ.)
- [4] Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин. М.: Майор, 2006. 592 с.  
Theoretical basis of the system analysis / V.I. Novoseltsev, B.V. Tarasov, V.K. Golikov, B.E. Dyomin. Moscow: Mayor, 2006. 592 p. (in Russ.)

- [5] **Брукс Ф.П.** Проектирование процесса проектирования. М.: Вильямс, 2014. 464 с.  
**Brooks, F.** The design of design. Moscow: Vil'jams, 2014. 464 p. (in Russ.)
- [6] Системы и комплексы космические. Термины и определения. ГОСТ Р 53802-2010. М.: Стандартинформ, 2011. 28 с.  
Systems and complexes space. Terms and definitions. GOST R 53802-2010. Moscow: Standartinform, 2011. 28 p. (in Russ.)
- [7] Packet telecommand standard ESA PSS-04-107. Issue 2: European Space Agency (ESA), 1992. 166 p.
- [8] Packet telemetry standard ESA PSS-04-106. Issue 1: European Space Agency (ESA), 1988. 73 p.
- [9] **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем. М.: Высшая школа, 2009. 343 с.  
**Sovetov, B.Ya., Yakovlev, S.A.** Modeling of systems. Moscow: Vysshaya shkola, 2009. 343 p. (in Russ.)
- [10] **Замятина О.М.** Моделирование систем. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 204 с.  
**Zamyatina, O.M.** Modelling of systems. Tomsk: Izd-vo TPU, 2009. 204 p. (in Russ.)
- [11] **Люгер Д.Ф.** Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е издание: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2005. 864 с.  
**Luger, G.F.** Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving (4th Edition). Publisher: Addison Wesley, 2001. 880 p.
- [12] **Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Грузенко Е.А.** Построение программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Информатизация и связь. 2014. Вып. 1. С. 87–93.  
**Nozhenkova, L.F., Isaeva, O.S., Gruzenko, E.A.** Designing the program-mathematical model for the spacecraft command and measuring system // Informatizatsiya i svyaz. 2014. Iss. 1. P. 87–93. (in Russ.)

*Поступила в редакцию 12 декабря 2014 г.,  
с доработки — 22 апреля 2015 г.*

### **The method for system modelling of the spacecraft on-board equipment**

NOZHENKOVA, LUDMILA F.\*, ISAEVA, OLGA S., GRUZENKO, EVGENY A.

Institute of computational modelling SB RAS, Krasnoyarsk, 660036, Russia

\*Corresponding author: Nozhenkova, Ludmila F., e-mail: [expert@icm.krasn.ru](mailto:expert@icm.krasn.ru)

We address a method for modelling of onboard equipment for the command and the measuring system of the spacecraft. The result of the method is the information and graphical simulation model that represents the specified level of details for the configuration and functions of the on-board equipment. A heuristic approach is used to support the model construction that allows a sequence of model changes in order to simulate the required specifications and functions of the equipment.

The model is designed to simulate the operation of a command-measuring system. The command-measuring system is designed for command-measuring control of onboard systems, transmission of telemetric information to Earth control complex, measurement of current navigation parameters of a spacecraft's orbit.

We have formally described the model of a command-measuring system, and also designed the methods and instruments allowing to present its architecture and a configuration of connections. The model's function rules are explicitly set in the knowledge base of the product. The rules describe the logics for operation of the command-measuring system: transfer of command information to spacecraft's systems, acceptance and transmission of telemetric information, conditions of the onboard equipment control, choice of interfaces for the equipment.

The research is carried out for creation of the "Program-mathematical model of the onboard equipment command and measurement system". The program includes the tools for model building and simulation. During the simulation it renders the sequence of actions defined for a specific model configuration. The software includes advanced configuration features models, statistical modelling of storage, management simulations, and analyze the results of the model. These functions allow a user to enter a variety of heuristics to analyze design solutions.

The program was put into trial operation in the JSC "Academician MF Reshetnev Information Satellite Systems".

*Keywords:* spacecraft, command and measuring system, support of designing of the onboard equipment, simulation modelling, heuristic method, step-by-step design.

**Acknowledgements.** The research is supported by Ministry of Education and Science (contract No. 02.G25.31.0041).

*Received 12 December 2014*

*Received in revised form 22 April 2015*