

algoritmov i programm tipovykh zadach [Collection of algorithms and programs of common tasks]. 2003, Vol. 21, p. 52. (In Russ.)

6. Dmitriev A. K. *Modeli i metody analiza tekhnicheskogo sostoyaniya bortovykh sistem*. [Models and methods of analysis of the technical state of the

onboard systems]. St. Petersburg, VIKU im. A. F. Mozhayskogo Publ., 1999.

7. Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, 432 p.

© Нестечук Н. Н., 2014

УДК 629.78; 004.94

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*

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

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
E-mail: expert@icm.krasn.ru

Рассматриваются архитектура, функциональные задачи и принципы построения программно-математической модели командно-измерительной системы космического аппарата. Назначение модели – поддержка конструирования бортовой аппаратуры.

Представлена имитационная модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Модель содержит инструменты графического представления всех этапов прохождения пакетов телекоманд и телеметрии.

Ключевые слова: программно-математическая модель, космический аппарат, командно-измерительная система, имитационное моделирование, пакеты телекоманд и телеметрии.

DESIGNING AND CONSTRUCTING OF THE PROGRAM-MATHEMATICAL MODEL FOR THE SPACECRAFT COMMAND AND MEASURING SYSTEM

L. F. Nozhenkova, O. S. Isaeva, E. A. Gruzenko

Institute of computational modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: expert@icm.krasn.ru

The functional scheme, tasks and programming strategy for designing the program-mathematical model of the spacecraft command-measuring systems are considered. The model purpose is to support the space-system engineering and testing the onboard hardware by the information technologies and mathematical modeling. The functional tasks and principles of the model software are proposed. The model architecture is a software package that allows to simulate and to analyze the hardware structure and functions by using the information, simulation, graphical and analytical methods. The model contains the tools for the graphical representation of all stages of command and telemetry packets transmission. Simulation model allows reproducing the work of the real system, without the presence of onboard equipments of the command-and-measuring system. The program-mathematical model will be used in the designers work simplification. Also it will be used for executing the verification tests and in the training mode – to solve teaching and research tasks.

Keywords: program and mathematical model, spacecraft, command and measuring system, simulation modeling, telecommand and telemetry packets.

Создание высокотехнологичного производства современной бортовой аппаратуры космического аппарата в большой степени опирается на программно-математическое моделирование технических уст-

ройств. Использование программно-математической модели позволяет ускорить и значительно удешевить процессы конструирования бортовых комплексов [1].

Командно-измерительная система (КИС) предна-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 02.G25.31.0041).

значена для передачи телеметрической информации со спутника на Землю, приема телекоманд из центра управления полетами, обработки и передачи их бортовым системам космического аппарата, а также для измерения текущих навигационных параметров орбиты. Командно-измерительная система представляет собой сложный технический объект, основу которого составляют высокотехнологичные элементы и программное обеспечение. Проектирование командно-измерительной системы является дорогостоящим процессом, для ее изготовления и анализа функционирования требуются специальные инструменты [2], к числу которых относится и программно-математическое моделирование.

Программно-математическая модель (ПММ) создается как программный комплекс, позволяющий имитировать функционирование реальной аппаратуры командно-измерительной системы с помощью инструментов информационной, графической, имитационной и аналитической поддержки функциональных задач КИС. ПММ может быть использована в процессе работы конструктора над проектом бортовой аппаратуры, для проведения проверочных испытаний, а также в обучающем режиме – для решения учебно-исследовательских задач.

Назначение и функциональные блоки программно-математической модели. Программно-математическая модель (рис. 1) создается с целью повышения эффективности работы конструктора-разработчика аппаратной части командно-измерительной системы за счет применения передовых информационных технологий и математического обеспечения для интеллектуальной поддержки [3] конструкторских задач. Назначение ПММ состоит в инструментальной поддержке функций конструктора бортовой аппаратуры при разработке и испытании командно-измерительных систем. Система должна обеспечивать имитацию архитектуры командно-измерительной системы и функционирования аппаратного обеспечения, анализ соответствия заданным техническим условиям.

Программно-математическая модель будет также обеспечивать поддержку испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы в сопряжении с контрольно-проверочной аппаратурой. Имитационное моделирование функционирования бортовой аппаратуры и визуализация процесса испытаний командно-измерительной системы будут использоваться для оценки новых технических решений и организации наглядного обучения. Программное обеспечение будет использоваться в учебном процессе при практической подготовке студентов и персонала эксплуатирующей организации для изучения принципов и особенностей работы командно-измерительной системы в условиях, максимально приближенных к реальным.

Подсистема имитационного моделирования имитирует все этапы функционирования элементов командно-измерительной системы при прохождении пакетов команд и телеметрии, процессы проведения испытаний, реакции подсистем и изменения наблюдаемых параметров. Информационная поддержка имита-

ционного моделирования осуществляется с применением баз данных, представляющих всю необходимую информацию для разных режимов работы модели: база команд центра управления полетами, база данных, описывающих аппаратуру командно-измерительной системы, допустимые пределы изменения параметров и др. Интеллектуальная поддержка функционирования модели осуществляется с применением базы знаний, описывающей правила поведения элементов КИС в разных ситуациях, что позволяет организовать работу модели как в автоматическом, так и в интерактивном пошаговом режиме. Визуальная часть программно-математической модели представляет структурную схему командно-измерительной системы. Средства графической визуализации позволяют динамически отображать состояние элементов модели в наглядной форме.

Система поддержки проведения испытаний включает в себя ряд функциональных подсистем, в том числе подсистему обеспечения функций взаимодействия с контрольно-проверочной аппаратурой. Подсистема подготовки сценариев позволяет создавать сценарии испытаний на основе заданного набора команд и входных параметров испытаний. Библиотеки программ связи с объектами представляют собой программное обеспечение для управления и передачи задач на аппаратные устройства. Развитые средства визуализации параметров обеспечивают оперативный мониторинг испытаний в реальном времени. Подсистема ведения архива испытаний предназначена для архивирования результатов испытаний в хранилище данных и поддержки последующего анализа. Подсистема подготовки отчетов позволяет формировать отчеты на основе исходных данных, сценариев работы, наборов команд, наблюдаемых параметров.

Система поддержки работы конструктора представляет собой не отдельное приложение, а набор режимов работы с программно-математической моделью, позволяющих решать разнообразные задачи. Система обеспечивает автоматизированную поддержку работы конструктора КИС над проектом бортовой аппаратуры. За счет применения имитационной модели обеспечивается анализ соответствия архитектуры КИС и функционирования аппаратного обеспечения заданным техническим условиям. С помощью ПММ конструктор может организовать проверочные испытания бортовой аппаратуры КИС в сопряжении с контрольно-проверочной аппаратурой.

Учебно-исследовательская система – это комплексная программная подсистема в структуре программно-математической модели, предназначенная для интерактивного обучения и приобретения знаний, навыков работы инженерно-техническим персоналом и студентами в объеме, необходимом для проектирования и тестирования составных частей комплекса бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. В состав учебно-исследовательской системы входят следующие основные подсистемы: информационно-справочная подсистема, имитационный тренажер, виртуальная лаборатория, планировщик обучения, подсистема контроля знаний. Программно-

математическая модель будет использоваться в учебном процессе при практической подготовке студентов и персонала эксплуатирующей организации путем изучения принципов и особенностей работы бортовой аппаратуры командно-измерительной системы в условиях, максимально приближенных к реальным.

Подсистема доступа и управления представляет собой комплекс сервисных подсистем, обеспечивающих взаимодействие основных функциональных блоков системы, доступ к информационному обеспечению, а также вспомогательные сервисные функции, такие как пополнение и коррекция баз данных и знаний, разделение доступа и др.

Имитационное моделирование командно-измерительной системы. В основу программно-математической модели положены принципы имитационного моделирования, позволяющие прогнозировать поведение командно-измерительной системы как сложного технического объекта. Имитационное моделирование опирается на информационно-графическое представление реальной структуры командно-измерительной системы. Структура представляется как набор интегральных свойств и характеристик элементов, а поведение – как процессы перехода между состояниями системы. Модель имитирует внутрисистемные процессы информационного обмена, а также механизмы внешнего взаимодействия. К модели предъявляются требования наглядности и компактности.

В настоящее время разработана первая очередь программно-математической модели, которая обеспечивает имитацию архитектуры и аппаратного обеспечения командно-измерительной системы. Моделируется работа бортовой аппаратуры, включая основные блоки – приемник, передатчик, интерфейсный модуль командно-измерительной системы (МИ КИС). Для полнофункционального моделирования работы бортовой аппаратуры командно-измерительной системы, кроме основных блоков, моделируются функции бор-

та космического аппарата и центра управления полетами (ЦУП). Графическая визуализация имитационной модели представлена на рис. 2.

Особенностью моделируемой командно-измерительной системы является организация связи с наземным комплексом управления в соответствии со стандартами европейского космического агентства. Взаимодействие с космическим аппаратом осуществляется с помощью двух типов данных: телекоманд и телеметрии. Телекоманды передаются из центра управления полетами на борт, а телеметрия представляет собой поток данных, передаваемый с борта космического аппарата на Землю. Передача телекоманд основана на стандарте ESAPSS-04-107 [4], а передача телеметрии – на стандарте ESAPSS-04-106 [5]. Стандарты обеспечивают надежность и достоверность информации и регламентируют состав и способ передачи данных [6].

Программно-математическая модель выполняет имитацию функционирования борта космического аппарата, в состав которого входят: бортовой цифровой вычислительный комплекс (БЦВК), бортовой комплекс управления (БКУ), бортовая аппаратура телесигнализации (БАТС). Интерфейсный модуль командно-измерительной системы непрерывно, с заданной периодичностью отправляет запрос бортовой аппаратуре телесигнализации для получения телеметрической информации. Бортовая аппаратура телесигнализации обрабатывает запрос и возвращает в интерфейсный модуль пакет, содержащий телеметрию борта. На основании полученной телеметрической информации от бортовой аппаратуры телесигнализации и от командно-измерительной системы интерфейсный модуль формирует телеметрический пакет в соответствии со стандартом ESAPSS-04-106 и отправляет его передатчику (ПРД). Передатчик, в свою очередь, передает пакет в наземный комплекс управления.

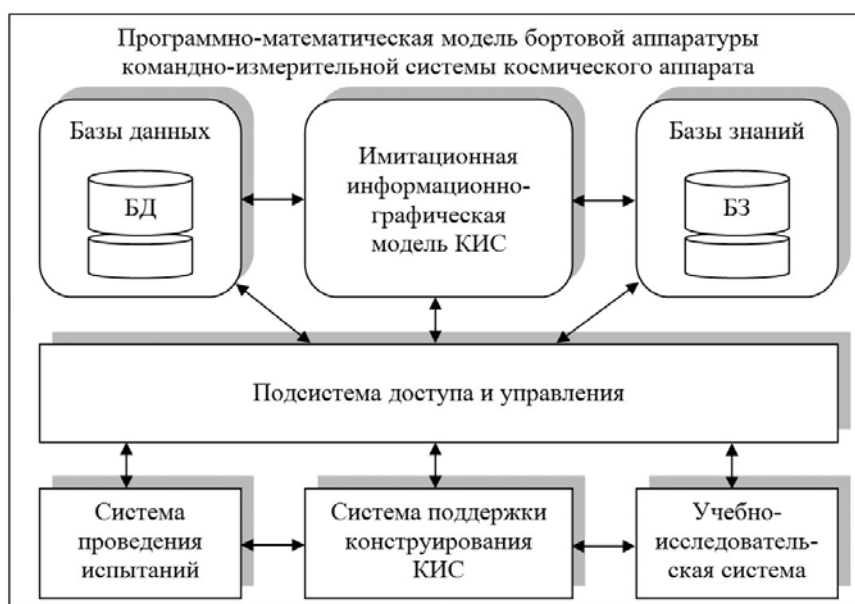


Рис. 1. Основные функциональные блоки ПММ

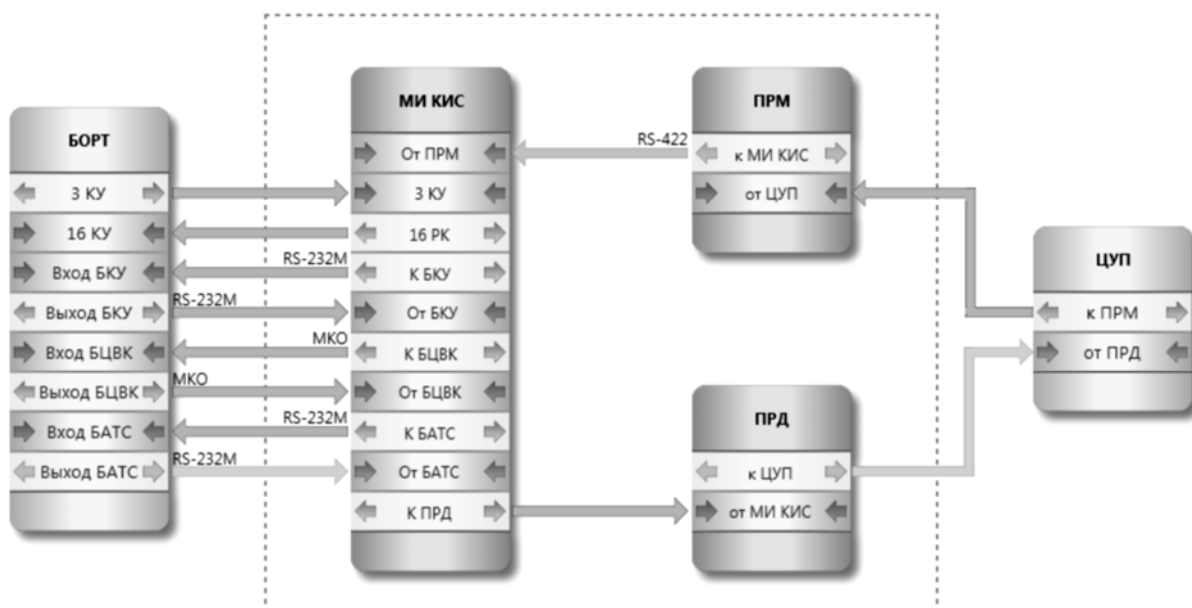


Рис. 2. Графическая модель: отображение прохождения сигнала

Модель наземного комплекса управления имитирует основные функции центра управления полетами: прием пакетов телеметрической информации; формирование и передачу пакетов радиокоманд в соответствии со стандартом PSS-04-107. Приемник (ПРМ) принимает пакеты радиокоманд 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.

Блоки программно-математической модели имеют набор настроек, который можно изменять в процессе имитации функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. При помощи настроек можно моделировать различные конфигурации бортовой аппаратуры командно-измерительной системы, а также имитировать нештатные ситуации и режимы работы. Помимо конфигурации самих блоков можно задавать конфигурацию протоколов передачи данных.

Программное обеспечение модели формирует протоколы приема и обработки пакетов данных и работы функциональных блоков. Протокол работы блоков содержит настраиваемые в процессе работы параметры приема, передачи сигналов, времени ожидания ответа и квитанции (рис. 3).

Отличительной особенностью различных экземпляров бортовой аппаратуры командно-измерительной системы является набор выполняемых команд, который зависит от назначения космического аппарата. Программное обеспечение модели имеет весь необходимый функционал для создания и актуализации базы команд в различных вариантах реализации бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. Последовательность команд, которая должна обрабатываться в процессе имитационного моделирования, задается в специальном интерфейсе. Этапы прохож-

дения и обработки команд отображаются в блоке настроек модели центра управления полетами. Команда имеет статусы «ожидает отправки», «отправлена» и «квитирована», изменение которых определяет текущее состояние работы модели с командой.

Разработанное программное обеспечение программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы обладает широкими средствами для настройки графического пользовательского интерфейса. Пользователь может настроить видимость, размер и расположение окон, способы отображения главного меню и панели быстрого доступа.

Взаимодействуя с системой через графический интерфейс, пользователь может сконфигурировать имитационную модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы, а также настроить протоколы связи, которые будут моделировать прохождение сигнала. В процессе симуляции можно изменять настройки блоков и моделировать нештатные ситуации, например, изменять время генерации телеметрии, отключать блоки, отвечающие за передачу телеметрии от борта, отключать квитирование команд и т. п.

Модель имитирует и визуализирует процесс передачи пакетов данных по каналам связи между блоками. В графическом представлении каждая передача данных сопровождается анимацией соответствующей связи.

По каждому блоку ведется протокол, в котором отображаются события, связанные с этим блоком. Протокол работы блока визуализируется в виде таблицы, которая обладает функциями фильтрации и группировки событий. Протоколы работы имитационной модели позволяют в наглядном виде анализировать особенности функционирования как отдельных блоков, так и командно-измерительной системы в целом.

Поддержка процессов подготовки и проведения испытаний. Проектирование функций организации и

поддержки проверочных испытаний командно-измерительной системы выполнено на основе анализа информационных потоков при взаимодействии программного обеспечения с оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры (рис. 4).

Для решения задачи информационно-графической поддержки проведения испытаний программное обеспечение реализует функции связи и работы с аппаратными средствами, входящими в состав контрольно-проверочной аппаратуры. К такому оборудованию относятся измерительные приборы, блоки источников питания, приборы, позволяющие проводить кодирование/декодирование, модуляцию/демодуляцию и усиление высокочастотных сигналов, имитаторы интерфейсных связей и другие аппаратные средства. Для управления оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры программно-математическая модель дополняется функциями связи с устройствами.

Система должна позволить проводить испытания как в ручном, так и в автоматическом режимах. При ручном режиме проведения испытаний необходима поддержка интерактивного взаимодействия с пользователем. Требуются специализированные средства создания сценариев испытаний, возможность задавать виды испытаний, наблюдаемые устройства, измеряемые параметры, критерии проверки, способы отображения измеряемых показателей и т. п. Средства гра-

фической визуализации и информационное обеспечение должно обеспечивать возможность проведения испытаний в автоматическом режиме вплоть до полной функциональной проверки бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. Все испытания должны сопровождаться функциями визуализации в режиме реального времени и анализом результатов после окончания испытаний.

Все процессы функционирования должны сопровождаться формированием отчетов, документированием, протоколированием испытаний, их результатов и дополнительных параметров оборудования.

Исследование потоков данных для задач поддержки, анализа, контроля и имитационного моделирования функций бортовой аппаратуры командно-измерительной системы позволило выделить основные функциональные задачи и выполнить проектирование подсистем программно-математической модели. В настоящее время система поддержки испытаний находится в стадии разработки.

Предложенный подход, заключающийся в комплексной инструментальной поддержке процессов конструирования и испытания бортовой аппаратуры, позволил выполнить проектирование программно-математической модели командно-измерительной системы и определить функциональные требования к подсистемам.

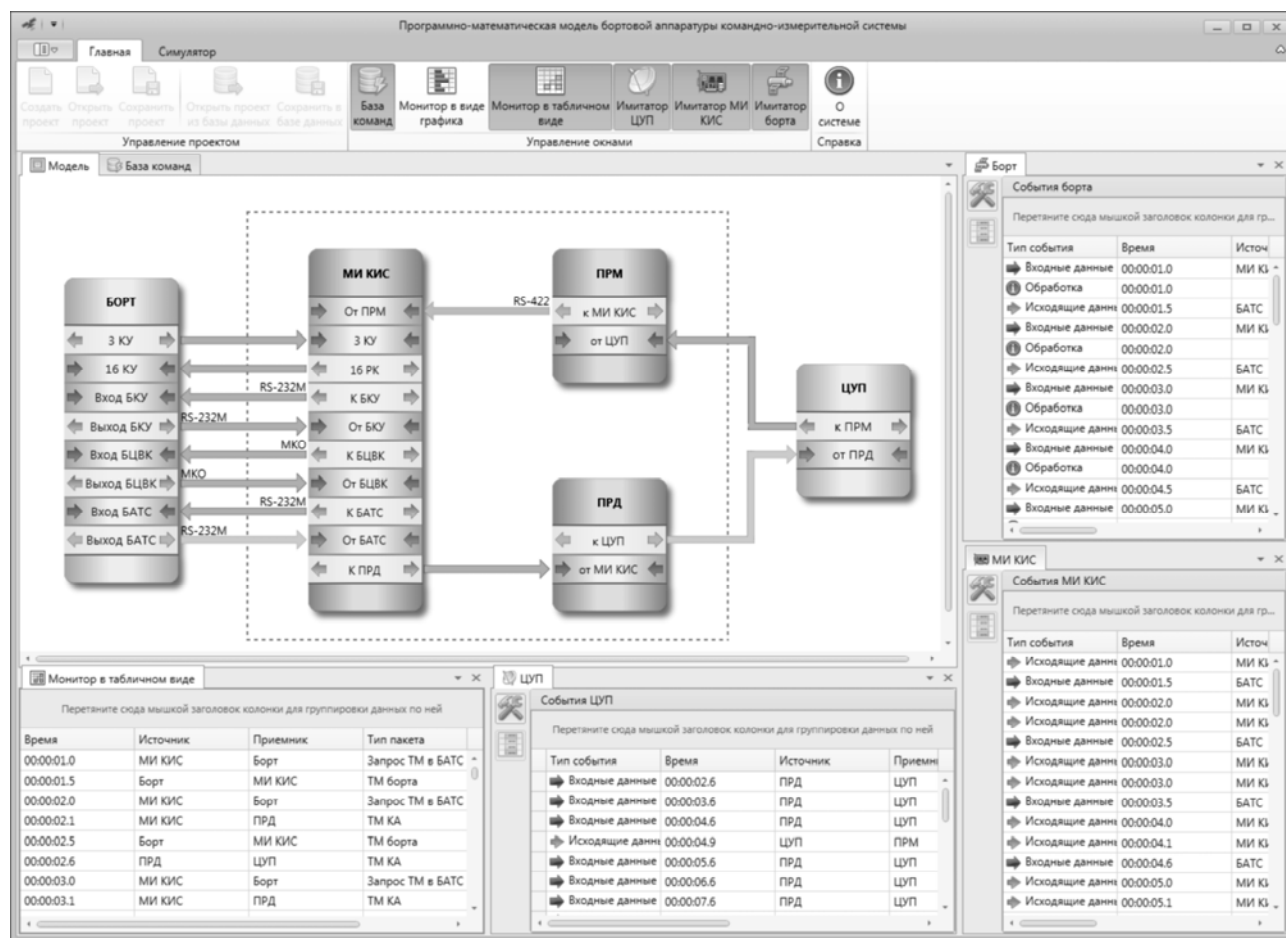


Рис. 3. Функционирование модели: визуализация имитационного моделирования

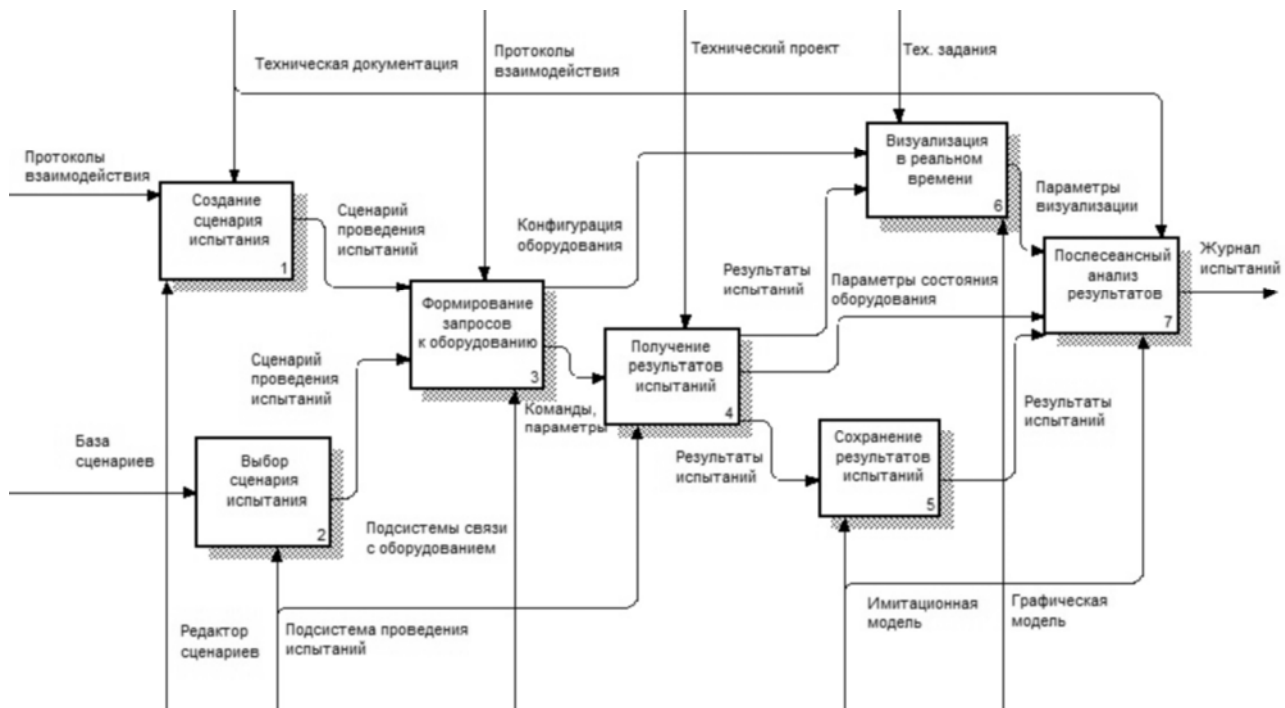


Рис. 4. Функциональная диаграмма для задачи проведения испытаний

Разработанная имитационная модель командно-измерительной системы позволила выполнять информационно-графическое моделирование поведения командно-измерительной системы. Алгоритмы взаимодействия элементов имитационной модели позволяют моделировать прохождение и анализ телекоманд, обработку запросов телеметрии.

Выполнено проектирование основных подсистем, предназначенных для обеспечения функционирования имитационной модели, организации учебно-исследовательской среды и вспомогательных сервисных функций. Ведутся работы по созданию программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры и учебно-исследовательской системы. Система информационно-графической поддержки проведения испытаний обеспечит взаимодействие с аппаратными средствами командно-программной аппаратуры. Учебно-исследовательская система позволит организовать обучение специалистов и операторов за счет использования программно-математической модели командно-измерительной системы в качестве тренажера и виртуальной лаборатории.

Библиографические ссылки

1. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. Бортовые системы управления космическими аппаратами. М. : МАИ-ПРИНТ. 2010. 304 с.
2. Разработка командно-измерительной системы для перспективных КА на базе платформы «Экспресс-4000» : метод. указания. Железнодорожск, 2012.
3. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2001. 384 с.
4. Packet Telecommand Standard (ESA PSS-04-107). Iss. 2. European space agency (ESA). 1992. 166 p.

5. Packet Telemetry Standard (ESA PSS-04-106). Iss. 1. European space agency (ESA). 1988. 73 p.

6. Вогоровский Р. В., Грузенко Е. А., Колдырев А. Ю. Моделирование протоколов передачи телекоманд и телеметрии // Проблемы информатизации региона : материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск : ИВМ СО РАН. 2013. С. 37–42.

References

1. Borovkin A. G., Burdigov B. G., Gordiiko S. V. *Bortovie sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami* [Onboard control systems of spacecrafts]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010, 304 p.
2. *Razrabotka komandno-izmeritel'noy sistemy dlya perspektivnykh KA na baze platformy «Express-4000»* [Development of command-measuring system for perspective KA on the basis of the «Express-4000» platform]. Zheleznogorsk, 2012.
3. Gavrilova T. A., Xoroshevskiy V. F. *Basi znaniy intellektualnih sistem* [Knowledge of bases of the intellectual systems]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2001, 384 p.
4. Packet Telecommand Standard (ESA PSS-04-107). Issue 2, European space agency (ESA). 1992, 166 p.
5. Packet Telemetry Standard (ESA PSS-04-106). Issue 1, European space agency (ESA), 1988, 73 p.
6. Vovorovskiy R. V., Gruzenko E. A., Koldirev A. Yu. [Modeling protocols of telecommand and telemetry]. *Materialy XIII Vserossiyskoy konferencii "Problemy informatizatsii regiona"* [Proceedings of XIII All-Russian scientific-practical conference "Problems of Informatization of the region"]. Krasnoyarsk, ICM SB RAS Publ., 2013, p. 37–42. (In Russ.)

© Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А., 2014