



УДК 629.78:004.94

**Л. Ф. Ноженкова, О. С. Исаева, Е. А. Грузенко,
Р. В. Вогоровский, А. Ю. Колдырев, А. А. Евсюков**
Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА КОНСТРУКТОРА БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА¹

Разработана технология комплексной автоматизированной поддержки конструирования командно-измерительной системы космического аппарата. Создано программное обеспечение, предназначенное для поддержки комплекса задач, возникающих на разных этапах проектирования и производства бортовой аппаратуры.

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

**L. F. Nozhenkova, O. S. Isaeva, E. A. Gruzenko,
R. V. Vogorovskiy, A. Yu. Koldyrev, A. A. Evsyukov**
Institute of computational modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

THE TECHNOLOGY FOR SPACECRAFT COMMAND-MEASUREMENT SYSTEMS' ONBOARD EQUIPMENT DESIGNER WORKPLACE AUTOMATION

We have developed the technology of the complex automated support for a spacecraft command-measurement system's construction. We have also created the software to support a complex of tasks appearing at different stages of the onboard equipment design and production.

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

Развитие высокотехнологичного производства космических аппаратов требует перехода на новый уровень автоматизации проек-

тирования и производства бортовой аппаратуры. Коллективом Института вычислительного моделирования (ИВМ) СО РАН разработана технология комплексной программно-инструментальной поддержки конструирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы, представляющей собой одну из важнейших бортовых систем космического аппарата. Она предназначена для измерения параметров движения, приема и передачи раз-

© Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А., Вогоровский Р. В., Колдырев А. Ю., Евсюков А. А., 2015

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

личных видов информации, формирования и передачи на космический аппарат команд и программ управления, стандартных частот и сигналов времени для синхронизации работы бортового комплекса управления [1].

Целью работы является автоматизированная поддержка решения задач, возникающих на разных этапах жизненного цикла разработки командно-измерительных систем, включая научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по проектированию, серийное производство и эксплуатацию. Для достижения этой цели разработано методическое и программное обеспечение, которое учитывает специфику каждого из этапов, но при этом технологически представляет собой единый программно-инструментальный комплекс.

В рамках единого программного обеспечения совмещены функции информационно-графического, имитационного моделирования, а также контрольно-проверочные функции для анализа работы командно-измерительной системы. Комплексная автоматизация направлена на расширение и дополнение возможностей экспериментального исследования [2]. Как правило, работы в данной области касаются решения отдельных задач моделирования или анализа [3], однако авторам в рамках выполненного проекта удалось решить не только перечисленные задачи, но и более сложную проблему – объединить их решение в уникальную технологию.

Междисциплинарные подходы к проектированию и созданию космических систем определяет стандарт «Space engineering. System engineering general requirements» Европейского космического агентства [4]. В нем предложен метод системной разработки, управляющий всеми этапами технических работ и позволяющий построить единое системное решение. Целостность системного подхода заключается в единых методах, применяемых как при разработке программного обеспечения, так и при использовании его функций для поддержки жизненного цикла сложных технических систем.

Основываясь на международных стандартах, авторы сформулировали задачи, требующие программного сопровождения и применения современных информационных технологий. К таким задачам относятся: поддержка проектирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы, модели-

рование особенностей ее функционирования, проведение различного вида испытаний. Под испытанием понимается экспериментальное определение количественных или качественных свойств объекта как результата воздействия на него при функционировании [5]. Достижение точности, достоверности и скорости получения результатов испытаний предъявляет дополнительные требования к программному обеспечению [6].

Кроме того, поскольку создание наукоемкого производства предполагает наличие высококвалифицированного персонала, комплексная поддержка жизненного цикла сложного технического объекта дополнительно должна включать средства обучения и повышения квалификации сотрудников эксплуатирующей организации.

Таким образом, программное обеспечение должно представлять собой не просто объединенный набор отдельных решений, а целостную интегрированную систему взаимосвязанных инструментальных модулей, предназначенных для моделирования, проектирования, анализа, обработки данных, проведения испытаний и сопровождения конструкторских задач.

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, подготовки и анализа результатов проверочных испытаний, а также в обучающем режиме – для решения учебно-исследовательских задач. Для решения задачи проведения испытаний разработано программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы – ПО КПА КИС. Разработанные программные системы представляют единый программный комплекс, позволяющий реализовать технологические этапы поддержки конструкторской деятельности по проектированию и производству бортовой аппаратуры командно-измерительных систем.

1. Системное проектирование

Для обеспечения различных этапов жизненного цикла командно-измерительной системы и комплексной поддержки констру-

ирования применялись методы системного проектирования программно-математической модели. Следуя принципам системного проектирования, выполнен совместный анализ объекта исследования и процесса его создания и функционирования с учетом особенностей взаимодействия и взаимосвязей отдельных объектов – систем и их частей, как между собой, так и с внешней средой [7].

Для успешной реализации конструкторских задач требуется поддержка моделирования объекта конструирования. Задача построения адекватной модели включает создание графического представления командно-измерительной системы, информационного описания структурных элементов и связей между ними и моделирования процесса ее функционирования. Основу модели командно-измерительной системы составляют функциональные блоки специального назначения: приемник, передатчик, интерфейс модуль командно-измерительной системы, описывающие возможности внутрисистемного информационного обмена. Внешнее взаимодействие командно-измерительной системы задается с помощью блоков бортовых систем космического аппарата и наземного комплекса управления. Для расширения возможностей графического моделирования в модель могут входить до-

полнительные или резервные элементы. Функции командно-измерительной системы определяются ее назначением. Они различаются для разных реализаций модели и могут быть описаны в виде базы знаний. Для поддержки конструирования выполнена интеграция средств информационно-графического моделирования и имитационного моделирования, которая позволяет выполнять анализ полноты и непротиворечивости конструкторских решений. Информационно-графическое моделирование является основой для проведения испытаний командно-измерительной системы, в этом случае модель строится в соответствии со спецификацией и техническими описаниями готового оборудования. Функции конструктора при проведении испытаний заключаются в создании последовательности управляющих воздействий на командно-измерительную систему средствами контрольно-проверочной аппаратуры для определения и анализа ее свойств и характеристик.

В результате системного анализа задач поддержки конструирования построена функциональная диаграмма (рис. 1), которая описывает задачи, на основе которых строится архитектура программного обеспечения [8].

Программное обеспечение реализует функции графического моделирования архитектуры командно-измерительной системы,

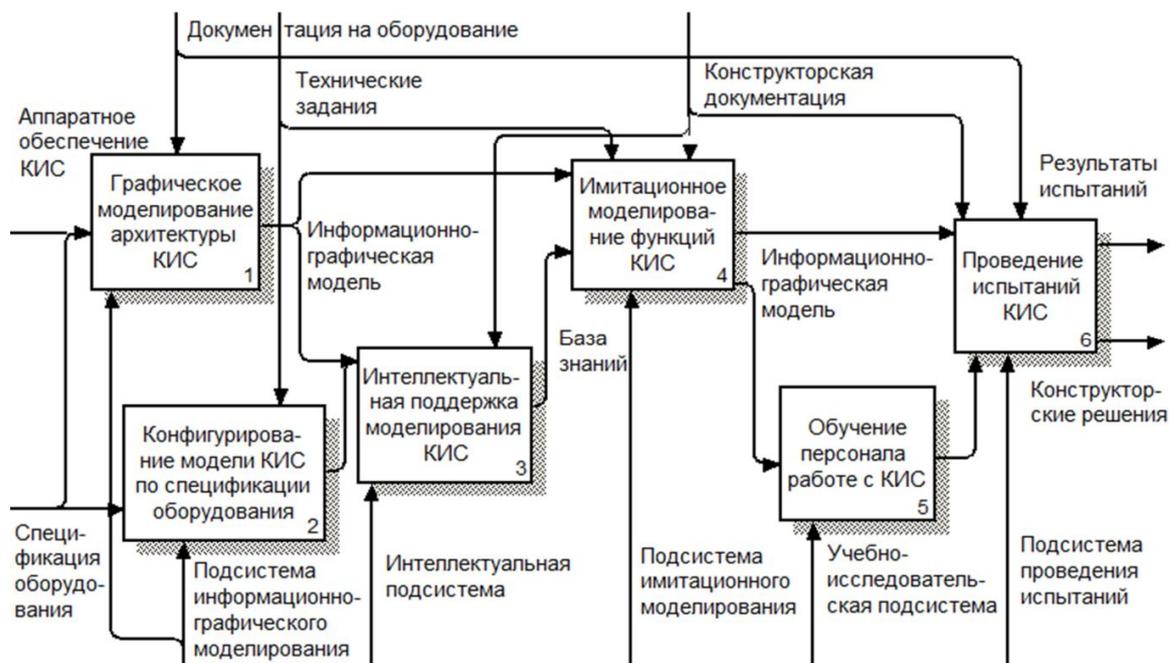


Рис. 1. Функциональная диаграмма поддержки конструирования

конфигурирования модели в соответствии со спецификацией оборудования, имитационного моделирования функционирования бортовой аппаратуры, обучения персонала эксплуатирующей организации, поддержки проведения испытаний командно-измерительной системы.

В связи со сложностью объекта исследования, неопределенностью целей и отсутствием в открытом доступе подобных решений, которые могли бы лечь в основу системного проекта, процесс создания функциональных диаграмм отдельных подсистем получился итерационным. Применение итерационного принципа проектирования позволило последовательно приблизиться к определению требований функционирования и условий их выполнения. Для оптимального распределения функций между программными системами выполнена унификация задач и сущностей объекта исследования. Построенные в результате диаграммы прошли верификацию и согласованы с экспертами предметной области, представителями заказчика.

В результате системного проектирования разработаны модели данных и принципы организации единого информационного пространства, необходимые как для работы отдельных подсистем, так и для проекта в целом (рис. 2).

Единое информационное пространство программно-аппаратного комплекса обеспе-

чивается за счет создания базы данных, хранилища данных, базы знаний, содержащих описания параметров, режимов функционирования, правил поведения блоков командно-измерительной системы, сценариев и результатов испытаний оборудования.

На рабочих местах конструкторов располагается основной программный комплекс – программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы (ПММ БА КИС), которая содержит следующий набор подсистем: подсистему информационно-графического моделирования, интеллектуальную подсистему имитационного моделирования, подсистему подготовки и анализа проведения испытаний, учебно-исследовательскую подсистему. Каждая подсистема предоставляет специализированный интерфейс, отражающий функции, соответствующие решаемым задачам. В составе контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) устанавливается программное обеспечение КПА КИС (ПО КПА КИС), которое решает задачу проведения испытаний по сценариям, предварительно подготовленным на рабочем месте конструктора с помощью инструментов ПММ БА КИС. Взаимодействие программного обеспечения осуществляется через оперативные базы данных и хранилище результатов испытаний, расположенных на серверах. Корректная актуализация данных обеспечивается за счет инструментов синхронизации.

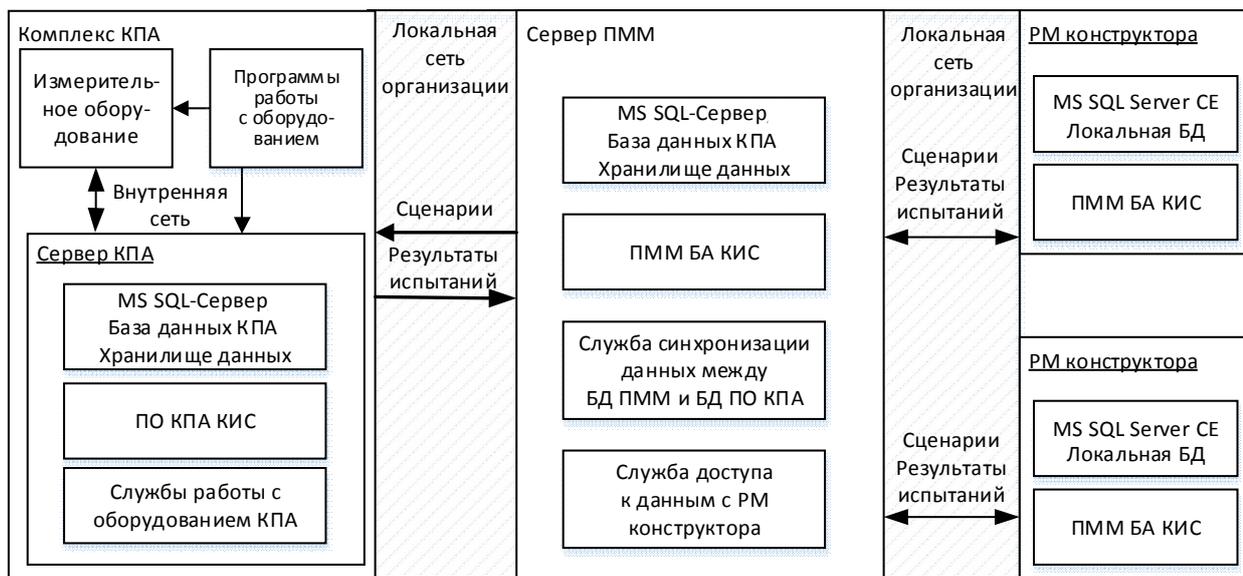


Рис. 2. Структура программно-аппаратного комплекса

2. Имитационное моделирование функционирования КИС

Ключевой подсистемой программно-математической модели является подсистема имитационного моделирования, которая имитирует все этапы функционирования элементов командно-измерительной системы при прохождении пакетов телекоманд и телеметрии, а также реакции модели на изменения наблюдаемых параметров. Имитационное моделирование позволяет изучить длительный интервал функционирования системы в сжатые сроки, менять настройки модели, задавать различные способы информационного обмена и выполнять другие эксперименты, которые на реальных системах провести невозможно [9]. Для разработки имитационной модели выполнен переход от содержательного к формальному описанию процесса функционирования командно-измерительной системы с учетом воздействия внешней среды.

Моделирование командно-измерительной системы позволяет проводить анализ функционирования аппаратуры с учетом изменения ограничений и целевых функций в условиях имитации взаимодействия с внешней средой. Основой имитационной модели является структурная схема бортовой аппаратуры командно-измерительной системы и построенная на ее основе информационно-графическая модель. Влияние внешней среды задается с помощью модели бортовых систем космического аппарата и наземного комплекса управления в части обеспечения внешнего командно-программного управления и управления системами космического аппарата. Методы функционирования модели задаются на основе описания вариантов логики работы командно-измерительной системы. Простой и наглядный способ описания действий модели позволяет конструктору самостоятельно представлять различные варианты работы оборудования. Описание представляется в базе знаний в виде совокупности продукционных правил. Каждое правило – это конструкция вида: «Если условие то действие». Левая часть правила задает условие выполнения, а правая часть – действия, изменяющие состояния модели. Например, правило выбора скорости формирования телеметрической информации (ТМИ) в основном комплекте интерфейсно-

го модуля командно-измерительной системы (МИ КИС) имеет вид:

Если Команда = U10002N

или Команда = Рестарт

То Комплект МИ КИС = Основной

и Скорость формирования ТМИ = 1000 бит/с

Продукционная модель знаний в простой и наглядной форме задает способы функционирования элементов модели при различных ситуациях и позволяет выполнять имитационное моделирование как в автоматическом, так и в интерактивном пошаговом режиме. Правила функционирования бортовой аппаратуры дают возможность осуществлять моделирование ее свойств и характеристик в объеме, необходимом для проведения исследований структуры, состава, функций и области изменения параметров модели [9].

Для реализации подсистемы имитационного моделирования были проанализированы существующие подходы, в том числе применение готовых пакетов [10], специализированных языков имитационного моделирования либо универсальных языков программирования. Применение готовых решений имитационного моделирования имеет как существенные преимущества, так и недостатки. Современные имитационные системы становятся все более проблемно-ориентированными [11]. Высокий уровень проблемной ориентации значительно упрощает их использование для определенных классов задач, а возможности сбора, обработки и вывода результатов моделирования позволяют быстро и подробно анализировать возможные исходы имитационного эксперимента [12]. Снижение эффективности проявляется при необходимости расширения области применения специализированных решений. Обзор средств имитационного моделирования показал наличие в них существенных технических и эксплуатационных недостатков для построения комплексных многофункциональных систем. Несмотря на наличие преимуществ применения специализированных средств имитационного моделирования, потребности обеспечения тесного взаимодействия между всеми программными модулями, поддерживающими различные задачи конструирования, привели к необходимости создания подсистемы имитационного моделирования как части единого программного обеспечения на

основе универсального языка программирования, единого для всей программно-математической модели. Такое решение позволило проводить едиными средствами информационно-графическое моделирование структуры и свойств командно-измерительной системы и применять построенную модель для выполнения и визуализации имитационного моделирования, а также осуществлять поддержку взаимодействия с реальным оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры в части проведения испытаний.

3. Организация подготовки и проведения испытаний

Комплексная поддержка целенаправленного ведения измерительного процесса для проведения испытаний командно-измерительной системы основывается на исследовании технологических подходов к задаче построения измерительных информационных систем. Под измерительной системой понимается совокупность функционально объединенных средств измерений, вычислительной техники и вспомогательных устройств, взаимодействующих между собой и предназначенных для выработки и анализа измерительной информации о физических величинах, свойственных объекту [6]. Измерительные системы имеют характерные особенности, которые учитывались при проектировании и создании

программного обеспечения: разнотипность измерительного оборудования и проводимых экспериментов, многократное изменение методики испытаний, расширяемость функций и набора исследуемых величин и др. Основные информационные процессы в такой системе: измерение и контроль, анализ и диагностика, сбор и хранение, отображение и обобщение. Назначение подсистемы проведения испытаний заключается в организации экспериментального определения количественных и качественных характеристик функционирования командно-измерительной системы для проверки соответствия установленным техническим требованиям. Измерительные функции обеспечиваются средствами контрольно-проверочной аппаратуры. Разработана схема подготовки и проведения испытаний оборудования командно-измерительной системы и анализа результатов испытаний (рис. 3).

Программное обеспечение ПММ БА КИС позволяет на рабочих местах конструкторов создавать сценарии проведения испытаний в виде последовательности измерений и действий на основе заданного набора команд и параметров оборудования. Под сценарием понимается формализованная последовательность воздействий на командно-измерительную систему для экспериментального определения количественных и качественных характеристик ее функционирования. Готовые

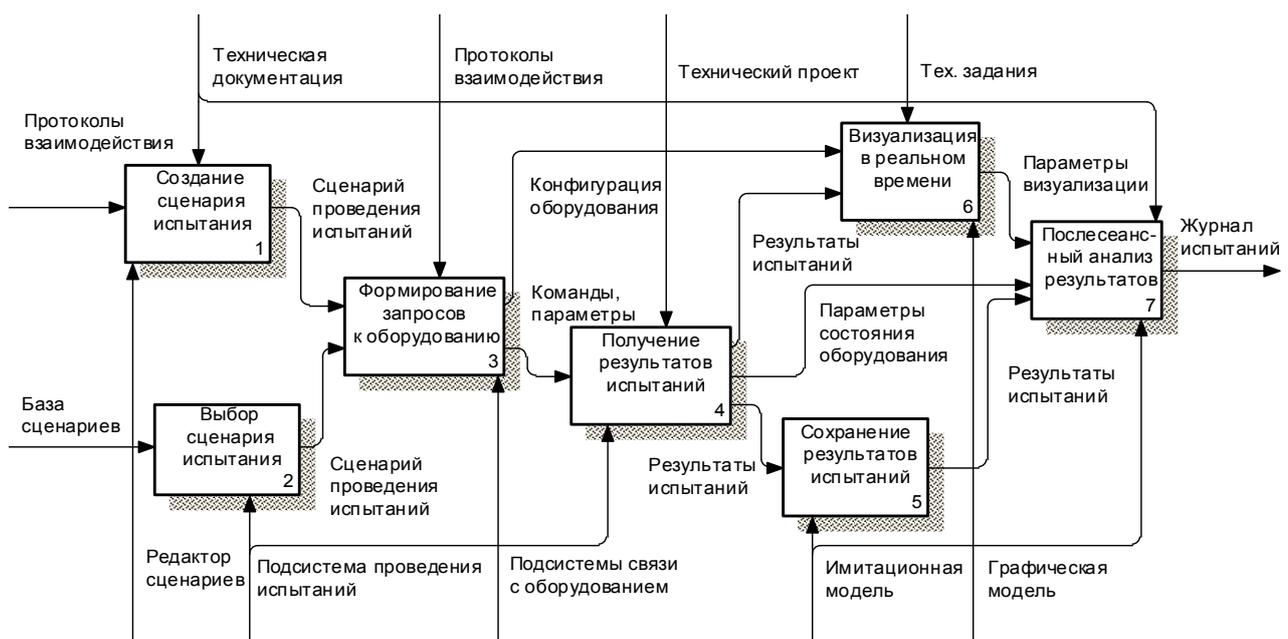


Рис. 3. Схема подготовки и проведения испытаний и анализа результатов

сценарии сохраняются в базе данных и в дальнейшем могут использоваться для проведения испытаний.

Функции анализа измерений, которые также предоставляются ПММ БА КИС, обеспечивают визуализацию результатов в графической и табличной форме, формирование реакций на выход за граничные условия, генерацию отчетов и рекомендаций по результатам проведенных испытаний.

Что касается непосредственного проведения испытаний, то эти задачи выполняет ПО КПА КИС. Выполняется выбор сценария из базы данных, формирование запросов к оборудованию, получение результатов испытаний и их сохранение в хранилище данных испытаний.

4. Организация обучения и решения исследовательских задач

Комплексная поддержка конструирования бортовой аппаратуры включает функции обеспечения подготовки специалистов к работе как с командно-измерительными системами, так и с разработанным программным обеспечением. Эти функции выполняет учебно-исследовательская подсистема ПММ БА КИС. Она представляет собой программный комплекс, предназначенный для интерактивного обучения и приобретения знаний, навыков работы инженерно-технического персонала и студентов в объеме, необходимом для проектирования и тестирования составных частей комплекса бортовой аппаратуры командно-измерительной системы.

В основе учебного курса лежит имитационная модель, позволяющая наглядно демонстрировать различные особенности функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. Модель может использоваться в качестве тренажера для задания учебно-тренировочных сценариев. Поддерживаются учебно-исследовательские функции [13], включающие 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, контроль профессиональной подготовки специалистов.

Объединение информационных технологий трансляции учебного материала с функциями тренажера обеспечивает новые возможности подготовки специалистов.

Разработана технология комплексной автоматизированной поддержки конструирования командно-измерительной системы космического аппарата. Создано программное обеспечение, предназначенное для графического и имитационного моделирования командно-измерительной системы, проведения испытаний функционирования оборудования, а также для решения учебно-исследовательских задач.

Непосредственно на рабочих местах конструкторов устанавливается программное обеспечение ПММ БА КИС, которое выполняет автоматизированную поддержку всех этапов конструирования бортовой аппаратуры на основе имитационного моделирования архитектуры и функционирования командно-измерительной системы в соответствии с назначением и условиями работы реального оборудования. Специально разработанное ПО КПА КИС, поддерживая взаимодействие с контрольно-проверочной аппаратурой, позволяет проводить испытания оборудования командно-измерительной системы. Функции анализа параметров функционирования оборудования и его соответствия техническим требованиям доступны не только в КПА КИС, но и с рабочих мест конструкторов. Учебно-исследовательские функции ПММ БА КИС позволяют обеспечить повышенные квалификационные требования к персоналу, занятому в отрасли.

Программное обеспечение выполнено на современном техническом уровне в соответствии с передовыми тенденциями развития информационных технологий. Применяемый комплексный подход даст возможность принимать научно обоснованные конструкторские решения на всех этапах жизненного цикла бортовой аппаратуры командно-измерительной системы.

Библиографические ссылки

1. Системы и комплексы космические. Термины и определения. ГОСТ Р 53802-2010. М. : Стандартинформ, 2011. 28 с.
2. Александровская Л. Н., Круглов В. И., Кузнецов А. Г. Теоретические основы испытаний и эксперимен-

- тальная обработка сложных технических систем. М. : Логос, 2003. 736 с.
3. Фраленко В. П. Методы и алгоритмы обработки потоков данных в многопроцессорных вычислительных комплексах командно-измерительных систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Переславль-Залесский, 2011. 21 с.
 4. Space engineering. System engineering general requirements ECSS-E-ST-10C. ESTEC, 2009. 100 p.
 5. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. ГОСТ 16504-81. М. : Стандартинформ, 2011. 24 с.
 6. Раннев Г. Г. Измерительные информационные системы. М. : Издательский центр «Академия», 2010. 336 с.
 7. Хорошев А. Н. Управление решением проектных задач на предприятии // Современные научные исследования и инновации. 2011. № 7. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2011/11/4940>.
 8. Маклаков С. В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite. 2-е изд., доп. М. : Диалог-МИФИ, 2007. 400 с.
 9. Замятина О. М. Моделирование систем : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2009. 204 с.
 10. Лычкина Н. Н. Технологические возможности современных систем моделирования // Банковские технологии. 2000. Вып. 9. С. 60–63.
 11. ARENA Users Guide. USA: Rockwell Software Inc., 2005. 142 p.
 12. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М. : Высш. шк., 2009. 343 с.
 13. Башмаков А. И., Башмаков И. А. Разработка компьютерных учебников и обучающих систем. М. : Информационно-издательский дом «Филинь», 2003. 616 с.

*Статья поступила в редакцию
26.10.2015 г.*