

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ПАРАМЕТРОВ И ЛОГИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

**Л. Ф. Ноженкова, О. С. Исаева, Р. В. Вогоровский,
Е. А. Грузенко**

Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация

Разработана технология, позволившая автоматизировать все этапы организации исследования функциональных характеристик командно-измерительной системы космического аппарата, обеспечить наглядность построения сложных последовательностей испытательных процедур приема-передачи команд, а также удобство и корректность отображения результатов.

Командно-измерительная система является одной из ключевых систем бортовой аппаратуры, в функции которой входит поддержка командно-программного управления системами и приборами космического аппарата и контроля их состояния со стороны наземного комплекса управления. С наземного комплекса управления передаются телекоманды, командно-измерительная система выполняет их прием, первичную обработку и передачу для выполнения в бортовой комплекс управления. В обратном направлении командно-измерительная система осуществляет передачу пакетов телеметрии с информацией о состоянии бортовых систем космического аппарата и результатами обработки телекоманд.

Внедрение программного обеспечения для автоматизации испытаний командно-измерительных систем на предприятии показало необходимость расширения его функциональных возможностей в части контроля и анализа логики работы оборудования при выполнении наземным комплексом командно-программного управления бортовой аппаратурой. Анализ функций отработки команд должен выполняться параллельно с проведением испытаний на соответствие физических характеристик техническим требованиям к оборудованию.

Для построения испытательных процедур разработано программное обеспечение, позволяющее имитировать внешнее командно-программное управление, задавая различные последовательности команд, выполняя контроль их отработки и анализ получаемой информации. Представленный подход расширяет возможности проведения экспериментальных исследований, позволяет сократить время проведения испытаний и повысить качество конструкторских решений.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая аппаратура, командно-измерительная система, испытания, сценарии испытаний, телеметрия, телекоманды.

Введение

Современные подходы к автоматизации испытаний бортовой аппаратуры являются основой развития наукоемкого производства космических аппаратов. Компьютерные технологии позволяют повысить качество, снизить себестоимость и сократить сроки разработки бортовых устройств.

Бортовая аппаратура представляет собой высокотехнологичную продукцию с длительным жизненным циклом. Испытания направлены на подтверждение соответствия параметров ее функционирования заданным требованиям. Повышенная сложность этой задачи обусловлена тем, что результаты испытаний в наземных условиях должны гарантировать работоспособность бортовой аппаратуры в течение срока активного существования в условиях космического пространства [1]. Для автоматизации проведения испытаний требуется применение специализиро-

ванного оборудования и программного обеспечения, которые должны обладать высокой надежностью, скоростью обработки информации, отвечать современным требованиям и иметь гибкую структуру, адаптируемую под конкретное применение. Программное обеспечение должно обладать удобным интерфейсом, обеспечивать наглядность построения сложных последовательностей испытательных процедур.

Исследование существующих систем автоматизации испытаний показало, что каждая из них направлена на решение узкого класса задач измерения или анализа и, как правило, имеет ограничения на расширение множества измерительных функций. Различные системы реализованы в разных программных средах, что затрудняет интеграцию, а в каких-то случаях делает невозможным совместное использование разработок разных производителей. Существуют продукты, которые позволяют интегрировать программные модули, написанные на разных языках, для выполнения задач имитации, верификации, проведения испытаний [2]. Кроме того, известны и применяются программные и технологические решения, позволяющие задавать методы проведения функционального контроля на основе формальной спецификации испытываемых систем [3]. Однако задачи адаптации существующих систем к заданной предметной области, создания интерфейсов наглядного построения испытательных процедур, реализации методов контроля приема и передачи данных по заданным стандартам в нашем случае представлялись невыполнимыми или слишком трудоемкими.

На основе проведенных исследований предложен собственный подход к автоматизации испытаний, разработана технология, создано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать все этапы подготовки и проведения испытаний бортовых систем космического аппарата.

Задачи автоматизации проведения испытаний

Правила проведения проверок различных объектов контроля определены базовыми стандартами. Например, стандарт ISO/IEC 9646 задает методологию проведения функциональных испытаний коммуникационных систем [4], стандарты Европейского космического агентства определяют правила и порядок испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата [1; 5], существуют отраслевые стандарты и методики отдельных предприятий. На основе стандартов разрабатываются программы испытаний, создаются специализированные программно-аппаратные комплексы.

Перед авторами была поставлена задача создания программного обеспечения для испы-

тательного комплекса – контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Разработанное программное обеспечение должно выполнять измерения и управлять оборудованием командно-измерительной системы посредством контрольно-проверочной аппаратуры.

Командно-измерительная система является одной из центральных систем космического аппарата. Она предназначена для информационного обмена между наземным и бортовым комплексами управления. С наземного комплекса управления выполняются прием телекоманд, их первичная обработка и передача для отработки в бортовой комплекс управления. В обратном направлении командно-измерительная система осуществляет передачу пакетов телеметрии с информацией о состоянии бортовых систем космического аппарата и результатами отработки телекоманд. Для унификации построенных решений в качестве протоколов передачи данных рассматриваются стандарты Европейского космического агентства. Стандарт ESAPSS-04-107 [6] предназначен для передачи телекоманд, а стандарт ESAPSS-04-106 [7] – для телеметрии.

Командно-измерительная система рассматривается в работе как черный или серый ящик в зависимости от типа проведения испытаний. Тестирование по типу черного ящика ведется с использованием технической документации, спецификации и других документов, описывающих требования к работе оборудования [3; 4]. Такие испытания предназначены для подтверждения электрических высоко- и низкочастотных характеристик функционирования командно-измерительной системы. Большинство испытаний бортового оборудования должно проводиться при контроле телеметрической информации, отражающей его состояние. Для испытаний приема и передачи телекоманд и телеметрии объект контроля представляется как серый ящик, в котором частично описаны структура и направления передачи данных. В этом случае командно-измерительная система рассматривается как набор связанных подсистем: передатчика, приемника и интерфейсного модуля. Приемник принимает аналоговый радиосигнал с наземного комплекса управления, преобразует его в цифровой вид и передает для дальнейшей обработки в интерфейсный модуль. Передатчик выполняет обратный порядок действий – принимает пакет данных в цифровом виде, преобразует его в аналоговый сигнал и передает на наземный комплекс управления. В интерфейсном модуле реализована логика обработки пакетов данных и взаимодействия с бортовым и наземным комплексами управления космическим аппаратом, включая выдачу ответов на различные запросы, а также самостоятельную выдачу запросов при необходи-

мости. Графическое отображение модели командно-измерительной системы показано на рис. 1.

В работе [8] описаны программные инструменты, предназначенные для построения моделей бортовой аппаратуры и имитационного моделирования ее функционирования. Применение имитационных моделей позволяет рассматривать структуру и методы взаимодействия подсистем объекта контроля для изучения особенностей их функционирования и построения испытаний [9].

Чтобы реализовать различные виды испытаний командно-измерительной системы, потребовалось разработать универсальные принципы описания и выполнения испытательных процедур. При этом программное обеспечение должно расширить возможности программно-аппаратного комплекса контрольно-проверочной аппаратуры и проводить испытания приема-передачи телекоманд, мониторинга и анализа телеметрии командно-измерительной системы космического аппарата.

Проведение имитационных экспериментов позволило выделить основные задачи, которые требуют программной поддержки в процессе подготовки и проведения испытаний приема-передачи команд и анализа телеметрии в командно-измерительной системе:

- формирование базы команд и структур телеметрии,
- задание списка команд и контрольных значений телеметрии,
- настройка передачи команд и приема телеметрии,
- выполнение передачи команд и приема телеметрии,
- анализ отработки команд.

Передача команд должна осуществляться как в автоматическом режиме, так и под управ-

лением пользователя. Такой подход позволит использовать программное обеспечение как инструмент исследователя на начальных этапах проведения испытаний для подготовки и апробации элементов испытательных процедур.

Авторами выполнена программная реализация, позволяющая решать все указанные задачи и осуществлять информационную и программно-инструментальную поддержку подготовки и проведения испытаний. Новые программные решения являются расширением функций существующих подсистем программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры ПО КПА КИС [10; 11].

Проведение испытаний и анализ результатов

Для программной реализации автоматизированных средств подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры разработана двухуровневая архитектура. На нижнем уровне расположены библиотеки программ работы с оборудованием контрольно-проверочной аппаратуры. Библиотеки программ, обеспечивающих взаимодействие, разработаны специалистами Сибирского федерального университета. Для библиотек используется технология виртуальных приборов, реализованная в программной среде LabVIEW [12]. На верхнем уровне решаются задачи настройки библиотек программ нижнего уровня, создания измерительных процедур, обработки результатов измерений. Программное обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры выполняет интеграцию различных виртуальных приборов и осуществляет управление процессом проведения испытаний [13].

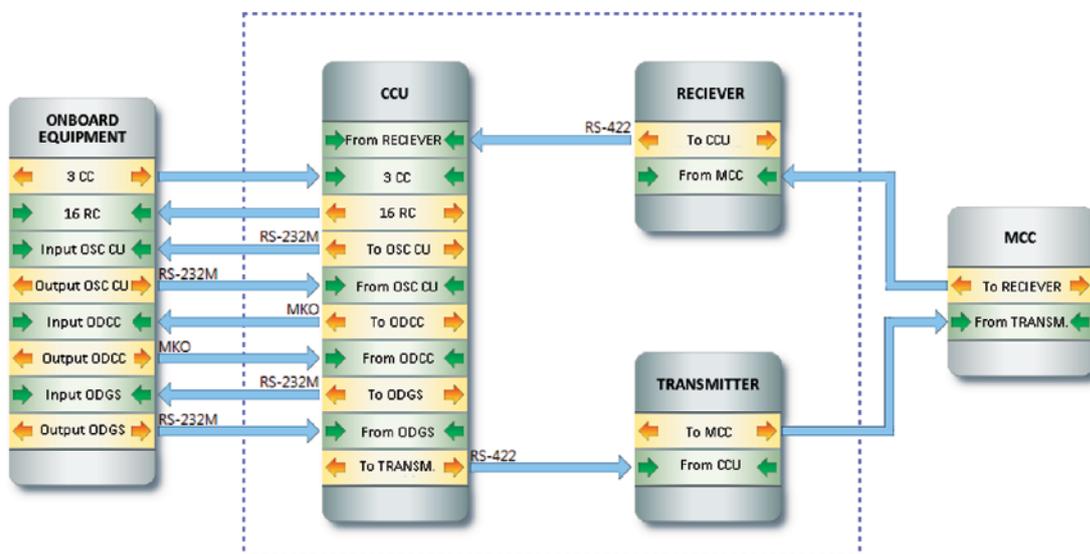


Рис. 1. Графическая модель объекта испытаний

В основе программного обеспечения верхнего уровня лежит понятие сценария. Под сценарием понимается формальное описание последовательно-параллельного выполнения измерительных операций, методы задания циклов, условных переходов и критериев контроля и остановки выполнения испытаний. Программы нижнего уровня в формальном описании сценария получили название «действия». В качестве действий могут выступать как функции контроля физических характеристик (измерение номинальной частоты, определение частоты и частотной нестабильности несущего колебания и измерение спектра), так и функции приема и передачи пакетов данных, построенных в соответствии со стандартами ESA. Обеспечение возможности выполнения последовательностей действий при обязательном приеме и контроле телеметрии, отражающей состояние бортовых систем и содержащей квитанции и параметры отработки команд, является важной частью предложенного подхода.

Формирование сценариев выполняется в визуальном редакторе в виде табличной структуры. Группы действий, необходимые для проведения комплексов измерений, объединяются в так называемые «задания», из которых могут быть построены различные сценарии испытаний. Применение такой архитектуры сценария испытаний позволило автоматизировать все испытательные процедуры для анализа функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Разработанное программное обеспечение управляет работой контрольно-проверочной аппаратуры, поэтапно выполняя каждое задание и действие в соответствии с заданным

сценарием испытаний. Параллельно осуществляются контроль и анализ измеренных параметров объекта испытаний. Подробное описание процессов подготовки испытаний представлено в [11].

Программное обеспечение для проведения испытаний бортовой аппаратуры внедрено на предприятии – разработчике спутниковых систем. Для внедрения предложена технологическая схема организации выполнения испытаний (рис. 2).

Проведение испытаний и анализ результатов сопровождаются визуализацией хода выполнения сценария, последовательности и параметров испытательных процедур, контрольных точек, результатов измерений, отображаются передаваемые и принимаемые пакеты данных (рис. 3).

Сценарии проведения испытаний выполняются автоматически. Программное обеспечение ведет постоянный контроль состояния оборудования и сигнализирует о выходе его параметров за граничные условия. В случае возникновения критических ситуаций оно самостоятельно принимает решение о прекращении проведения испытаний. Все возникающие в процессе проведения испытаний события протоколируются и представляются пользователю. По результатам испытаний строится отчет, в котором детализируются различные особенности функционирования объекта контроля.

Подготовка и проведение испытаний приема-передачи команд и телеметрии

Для имитации функций наземного и бортового комплекса управления разработано визуальное окно настройки команд. В редакторе задаются

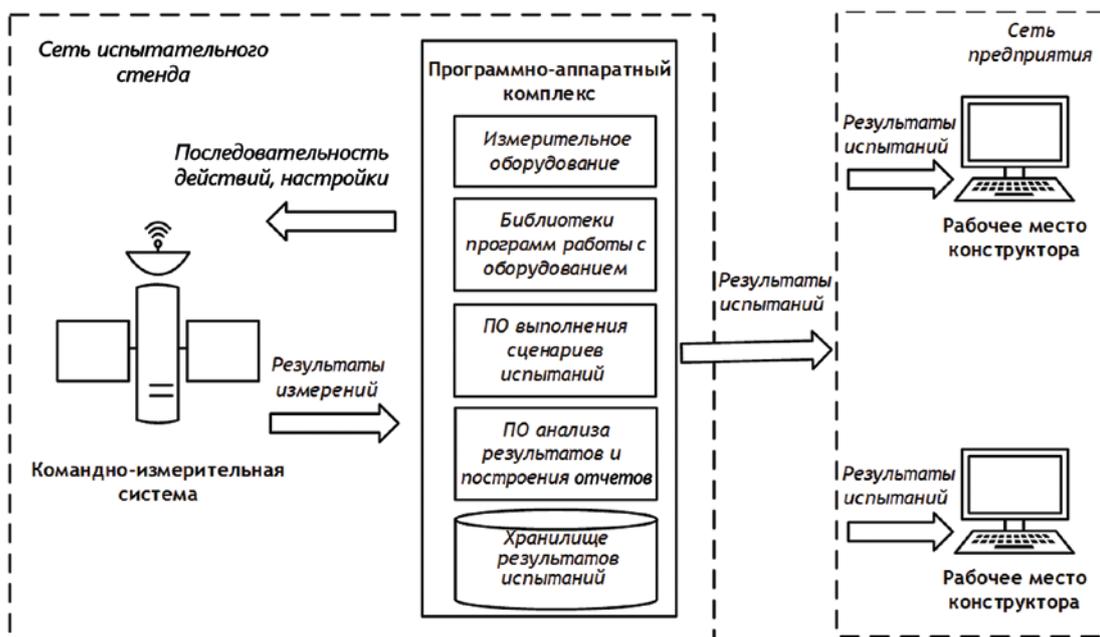


Рис. 2. Схема организации выполнения испытаний

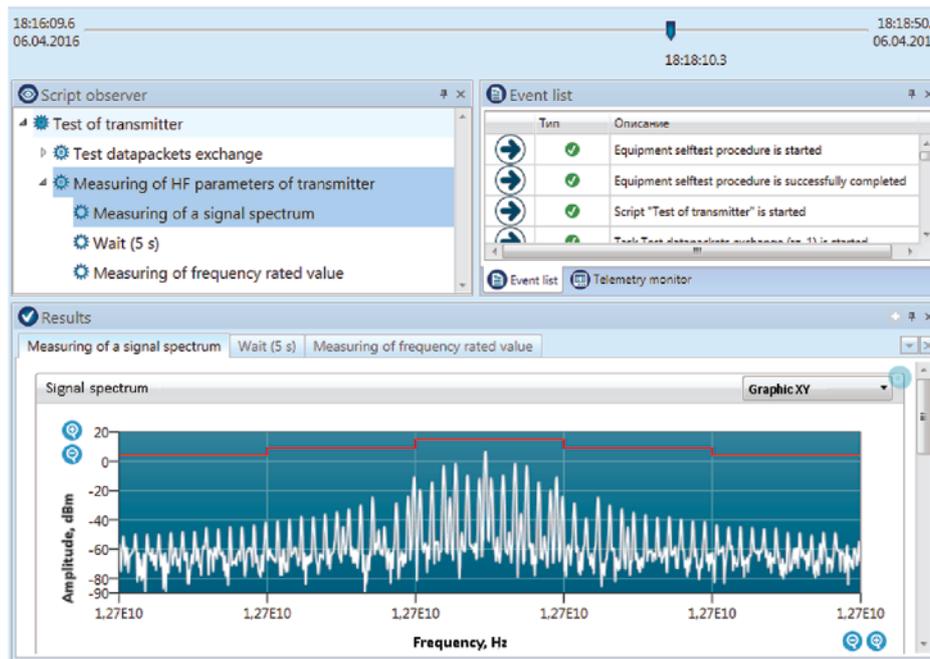


Рис. 3. Отображение процесса проведения испытаний

перечень команд и настройки ее передачи: коммутационный интерфейс, время ожидания реакции на команду в телеметрии, количество повторения отправки команды, способ передачи, контролируемые поля и контрольные значения пакета телеметрии и др. (рис. 4). Для каждого испытания может быть настроено произвольное число команд, выдаваемых последовательно в заданном конструктором бортовой аппаратуры порядке.

Передача заданной последовательности команд осуществляется подсистемой выполнения испытаний. Программные имитаторы выполняют взаимодействие с объектом контроля, передачу команд и данных для телеметрии, их анализ и в соответствии с алгоритмами работы оборудования и заданными периодами ожидания. Объект контроля – командно-измерительная система обрабатывает собственные алгоритмы функционирования, получая команды, анализируя, выполняя или передавая их в программное обеспечение, играющее роль имитатора бортового комплекса управления, формируя телеметрию и передавая ее в имитатор наземного комплекса управления. В случае нарушений работы объекта контроля программное обеспечение имитаторов бортовых устройств будет получать некорректные данные и отобразит обнаруженные ошибки в окне мониторинга. В случае возникновения нештатных ситуаций программное обеспечение может принять решение об остановке испытаний. Проведение испытаний с имитаторами на начальном этапе позволит всесторонне и качественно изучить работу исследуемого оборудования.

Программное обеспечение ведет журнал обработки команд и осуществляет непрерывный

мониторинг с визуализацией телеметрии, получаемой от оборудования. Результаты обработки команд показаны на рис. 5.

В окне телеметрии на разных закладках визуализируется телеметрический кадр в шестнадцатеричной системе счисления и в виде отдельных отчетов по заданным группам параметров. Настройка и группировка параметров выполняется в редакторе пакетов данных. Для каждого параметра показывается полученное значение в двоичном или десятичном виде. Все изменения параметров в поступающей телеметрии отображаются в окне мониторинга. Данные окна можно со-

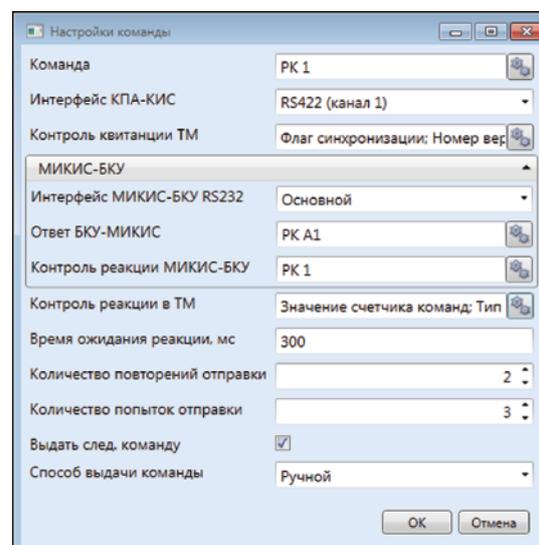


Рис. 4. Интерфейс настройки передачи команд

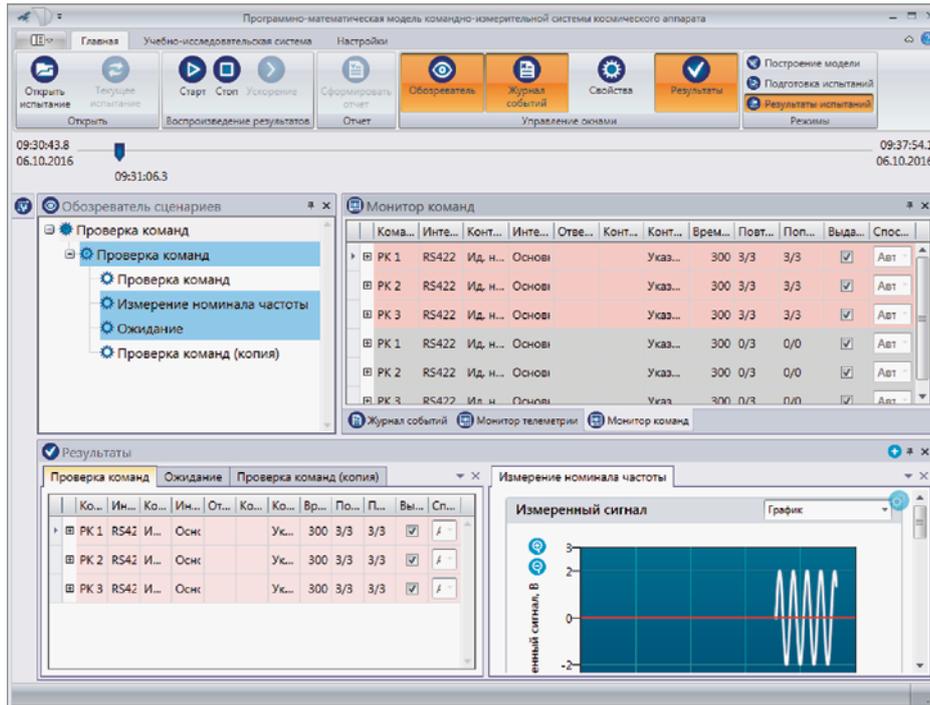


Рис. 5. Просмотр результатов проверки команд

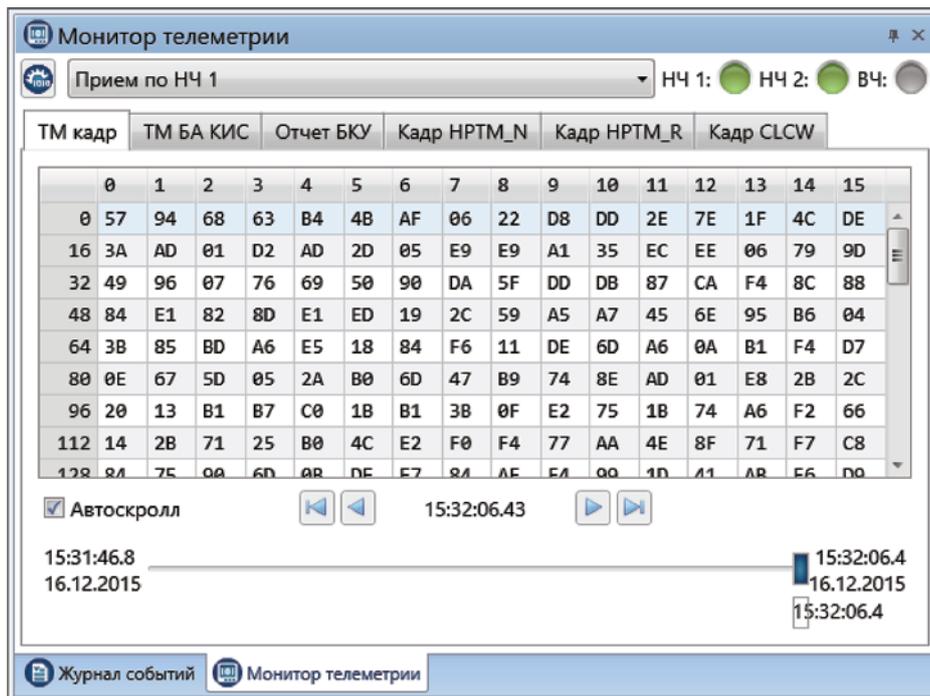


Рис. 6. Мониторинг телеметрии

ртировать, группировать, фильтровать, настраивая удобный способ отображения.

Использование программного обеспечения для создания испытательных процедур приема-передачи команд и анализа телеметрии расширяет возможности исследования бортовой аппаратуры и повышает качество и надежность проводимых испытаний.

Заключение

Внедрение программных инструментов мониторинга телеметрии в программно-аппаратный комплекс контрольно-проверочной аппаратуры позволяет проводить тестирование физических характеристик командно-измерительной системы и методов анализа логики ее функционирова-

ния при постоянном контроле телеметрии, представляющей информацию о реальном состоянии оборудования. Разработанные программные подсистемы обеспечивают наглядность построения сложных последовательностей испытательных процедур приема-передачи команд, а также удобство и корректность отображения результатов.

Разработанное программное обеспечение внедрено в программно-аппаратный комплекс, предназначенный для выполнения электрических высоко- и низкочастотных испытаний командно-измерительных систем в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».

Список литературы

1. ECSS-E-ST-10-02C. Space engineering – Verification – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2009. 45 p.
2. ECSS-E-ST-10-03C. Space engineering – Testing – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2012. 128 p.
3. Tretmans J., Belinfante A.: Automatic testing with formal methods. Enschede : University of Twente, Centre for Telematics and Information Technology (1999).
4. Telemans J.: Testing Concurrent Systems: A Formal Approach. CONCUR'99 Concurrency Theory. P. 46–65. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1999).
5. Garavel H.: OPEN/CÆSAR: An open software architecture for verification, simulation and testing. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. P. 68–84. Springer Berlin Heidelberg (1998).
6. ISO/IEC 9646-1: Information Technology – Open Systems Interconnection – Conformance testing methodology and framework. Part 1: General concepts, 1994. 46 p.
7. ITU-T Recommendation Z.500 – Framework on formal methods in conformance testing, 1997. 49 p.
8. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzhenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment. Proceedings series Advances in Computer Science Research (ISSN 2352-538x), Vol. 18. P. 943–945, DOI: 10.2991/cisia-15.2015.
9. Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А. Комплексная поддержка конструирования бортовых систем контроля и управления космических аппаратов на основе интеллектуальной имитационной модели // Информационные технологии. 2015. № 9. С. 706–714.
10. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Vogorovskiy R. V. Automation of Spacecraft Onboard Equipment Testing. International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering (ISSN 2352-5401). 2016. P. 215–217, DOI: 10.2991/amsee-16.2016.57.
11. Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Вогоровский Р.В. Подготовка и проведение испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Исследования наукограда. 2015. № 4(14). С. 60–67.
12. LabVIEW function and VI reference manual. National Instruments Corporation, Austin, Texas, 1998.
13. Вогоровский Р. В. Организация взаимодействия с измерительным оборудованием при проведении испытаний бортовой аппаратуры КА // Молодой ученый. 2015. № 11. С. 22–27.

AUTOMATION OF TESTING THE SPACECRAFT COMMAND AND MEASURING SYSTEMS' CHARACTERISTICS AND FUNCTIONAL LOGIC

L. F. Nozhenkova, O. S. Isaeva, R. V. Vogorovskiy, E. A. Gruzhenko

Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

We have developed a technology allowing to automate all stages of testing of spacecraft command and measuring systems' functional characteristics and providing construction of complicated sequences of command test procedures and visualization of results.

The command and measuring system is one of the onboard equipment's key systems, its functions are support of command and software control of a spacecraft's systems and devices and control of their condition from the Earth control complex. The Earth complex transmits telecommands and the command and measuring system performs their reception, primary processing and transmission to the onboard control complex for execution. Backwards, the command and measuring system provides transmission of the telemetry packages containing information about condition of spacecraft onboard systems and the results of telecommand performance.

Implementation of the software for automation of testing command and measuring systems by a company-producer has shown the necessity to expand its functional abilities in the area of control and analysis of the

logics of work of the equipment during Earth complex's command and measuring control over onboard equipment. The command execution analysis must be performed together with tests on compliance of physical characteristics with technical requirements to the equipment.

In order to build testing procedures we have designed software allowing to simulate external command and software management by setting different sequences of commands, controlling their execution and analyzing the received data. This approach extends the possibilities of conducting tests, allows to reduce the time of testing and improve the quality of designer solutions.

Key words: spacecraft, onboard equipment, command and measuring system, testing, scenarios of testing, telemetry, telecommands.

References

1. ECSS-E-ST-10-02C. Space engineering – Verification – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2009. 45 p.
2. ECSS-E-ST-10-03C. Space engineering – Testing – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2012. 128 p.
3. Tretmans J., Belinfante A.: Automatic testing with formal methods. Enschede : University of Twente, Centre for Telematics and Information Technology (1999).
4. Telemans, J.: Testing Concurrent Systems: A Formal Approach. CONCUR'99 Concurrency Theory. P. 46–65. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1999).
5. Garavel H.: OPEN/CÆSAR: An open software architecture for verification, simulation, and testing. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. P. 68–84. Springer Berlin Heidelberg (1998).
6. ISO/IEC 9646-1: Information Technology – Open Systems Interconnection – Conformance testing methodology and framework. Part 1: General concepts, 1994. 46 p.
7. ITU-T Recommendation Z.500 – Framework on formal methods in conformance testing, 1997. 49 p.
8. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment. Proceedings series Advances in Computer Science Research (ISSN 2352-538x), Vol. 18. P. 943–945, DOI: 10.2991/cisia-15.2015.
9. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Vogorovskiy R. V., Koldyrev A. Yu., Evsyukov A. A. Kompleksnaya podderzhka konstruirovaniya bortovoykh sistem kontrolya i upravleniya kosmicheskikh apparatov na osnove intellektual'noy imitatsionnoy modeli [Complex support of designing onboard control and management systems of spacecrafts on the basis of intellectual simulation model]. Information Technology. 2015. № 9. P. 706–714. (In Russ.)
10. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Vogorovskiy R. V. Automation of Spacecraft Onboard Equipment Testing. International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering (ISSN 2352-5401). 2016. P. 215–217, DOI: 10.2991/amsee-16.2016.57.
11. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Vogorovskiy R. V. Podgotovka i provedenie ispytaniy bortovoy apparatury komandno-izmeritel'noy sistemy kosmicheskogo apparata [Preparation and testing of onboard equipment of the spacecraft command and measuring system]. The Research of the science city. 2015. № 4(14). P. 60–67. (In Russ.)
12. LabVIEW function and VI reference manual. National Instruments Corporation, Austin, Texas, 1998.
13. Vogorovskiy R. V. Organizatsiya vzaimodeystviya s izmeritel'nym oborudovaniem pri provedenii ispytaniy bortovoy apparatury KA [Organization of interaction with the measuring equipment during testing onboard the spacecraft equipment] // Molodoy uchenyy. 2015. № 11. P. 22–27. (In Russ.)