

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. А. Комаров¹, А. В. Сарафанов²

^{1,2} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹ Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева, Железногорск, Россия

² Витте Консалтинг (ГК «АЙ-ТЕКО»), Москва, Россия

¹ vkomarov@iss-reshetnev.ru, ² sarafanov@i-teco.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Внедрение новых средств технологического оснащения процессов экспериментальных исследований бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления космических аппаратов на этапах ее производства и поддержки эксплуатации обуславливает необходимость обновления соответствующего методического обеспечения с учетом сформированных направлений развития цифровизации в ракетно-космической отрасли. *Материалы и методы.* Новое техническое решение аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения реализовано на основе использования аппаратно-программных ресурсов в режиме временного разделения. Внедрение эмулятора в производственную деятельность повышает степень автоматизации производственных процессов предприятия, а новые методики его прикладного применения реализуют механизмы информационной поддержки процессов жизненного цикла бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. *Результаты.* Разработан аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий эмуляцию работы восьми интерфейсных модулей сопряжения для вычислительного модуля аппаратуры в режиме жесткого реального времени на основе одного комплекта оборудования. Функциональные возможности эмулятора обеспечили повышение информативности проводимых исследований аппаратуры за счет возможности реализации расширенных методик испытаний (имитация отказов блоков аппаратуры, отладка режима автономного сохранения ориентации космического аппарата, работа с резервными комплектами и др.). Предложены методики применения эмулятора в качестве средств технологического оснащения прикладных экспериментальных исследований бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на этапах ее проектирования и эксплуатации. *Выводы.* Внедрение в организационно-техническую систему предприятия аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения в комплексе с новым методическим обеспечением процессов прикладных экспериментальных исследований позволило: реализовать механизмы интеграции и управления служебными данными об изделии в рамках единого информационного пространства предприятия; повысить на этапах проектирования и эксплуатации качество наземной экспериментальной отработки аппаратуры; сократить материальные затраты на необходимое технологическое оснащение испытаний; снизить влияние человеческого фактора на воспроизводимость результатов испытаний; а также повысить отказоустойчивость космических аппаратов в целом на этапе их эксплуатации.

Ключевые слова: бортовая радиоэлектронная аппаратура, космический аппарат, испытания, автоматизация, временное разделение, программное обеспечение, цифровой двойник, информационная поддержка, электронное предприятие

Для цитирования: Комаров В. А., Сарафанов А. В. Повышение качества наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления космических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 61–69. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-8

INCREASING THE QUALITY OF GROUND EXPERIMENTAL RESEARCH OF ONBOARD ELECTRONIC EQUIPMENT FOR SATELLITE CONTROL SYSTEMS

V.A. Komarov¹, A.V. Sarafanov²

^{1,2} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ Information Satellite Systems named after Academician M.F. Reshetnev, Zheleznogorsk, Russia

² Witte Consulting (GC "AI-TECHO"), Moscow, Russia

¹ vkomarov@iss-reshetnev.ru, ² sarafanov@i-teco.ru

Abstract. *Background.* The introduction of new means of technological equipment for the processes of experimental research of on-board radio-electronic equipment of satellite control systems at the stages of its production and operation support necessitates updating the corresponding methodological support, taking into account the formed directions of digitalization in the rocket and space industry. *Materials and methods.* A new technical solution for the hardware-software emulator of interface modules is implemented on the use of hardware-software resources in the time-sharing mode. The introduction of the emulator into production activities increases the degree of automation of the production processes of the enterprise, and new methods of its application implement the mechanisms for information support of the life cycle processes of the onboard radio-electronic equipment of satellite. *Results.* A hardware-software complex has been developed, its provide emulation of the operation of eight interface modules for the computing module of the onboard equipment in hard real-time mode based on one set of technological equipment. The functionality of the emulator provided an increase in the information content of the ongoing research of the equipment due to the possibility of implementing extended test methods (imitation of failures of equipment units, debugging the mode of autonomous preservation of the attitude of the satellite, working with backup sets, etc.). Methods for using the emulator as a means of technological equipment for applied experimental research on the onboard radio-electronic equipment of satellite at the stages of its design and operation are proposed. *Conclusions.* The implementation of a hardware-software emulator of interface modules into the organizational and technical system of the enterprise in combination with new methodological support for the processes of applied experimental research made it possible to: implement the mechanisms for integrating and managing service data about the product within the framework of a single information space of the enterprise; to improve the quality of ground experimental testing of equipment at the stages of design and operation; reduce material costs for the necessary technological equipment for testing; reduce the influence of the human factor on the reproducibility of test results; as well as to improve the fault tolerance of spacecraft as a whole at the stage of their operation.

Keywords: onboard electronic equipment, satellite, testing, automation, time-sharing, software, digital twin, information support, electronic enterprise

For citation: Komarov V.A., Sarafanov A.V. Increasing the quality of ground experimental research of onboard electronic equipment for satellite control systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):61–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-8

Введение

Внедрение вычислительных устройств в бортовую радиоэлектронной аппаратуру (БРЭА) систем управления перспективных космических аппаратов (КА) с длительным сроком активного существования (до 15 лет и более) в комплексе с повышенными требованиями к безотказности ее функционирования обуславливают необходимость создания специализированных автоматизированных систем прикладных экспериментальных исследований как на этапах проектирования, так и на этапах последующей эксплуатации [1–8]. Одним из решений, направленным на повышение полноты и рациональности использования трудовых и материальных ресурсов предприятия на основе новейших достижений научно-технического прогресса, является разработанный, внедренный и успешно эксплуатируемый в АО «ИСС» аппаратно-программный эмулятор интерфейсных модулей сопряжения (ИМС) с временным разделением аппаратно-программных ресурсов [2, 9]. Данный эмулятор входит в состав наземного комплекса автономной отработки (испытаний) специального программного обеспечения (СПО) унифицированного вычислительного модуля (ВМ) БРЭА систем управления КА (блок управления, блок интерфейсный) [1, 2, 9–12]. Как известно, внедрение новых технологий и средств технологического оснащения в рамках процессов интенсификации производства обуславливает необходимость совершенствования методического обеспечения соответствующих технологических процессов, в том числе и процессов экспериментальных исследований БРЭА КА на различных этапах ее жизненного цикла. Таким образом, разработка методик применения эмулятора интерфейсных модулей сопряжения в качестве нового технологического оборудования и его интеграция в организационно-техническую систему предприятия является актуальной задачей [13, 14].

Материалы и методы

Управление технологическим процессом автономного тестирования СПО ВМ БРЭА КА осуществляется посредством взаимодействия оператора с графическим интерфейсом управляющей ЭВМ наземного комплекса автономной отработки [11, 12]. На основе графического интерфейса выполняются:

- загрузка тестируемой версии СПО ВМ через технологический канал;
- конфигурирование эмулятора ИМС (настройка адресов, алгоритмов преобразования команд управления и пр.);

– формирование и выдача внешних команд управления, а также сбор и отображение телеметрической информации о функционировании ВМ и ИМС.

Обобщенная структурная схема наземного комплекса приведена на рис 1.

*Конструктивно-технологическая реализация
эмулятора на базе промышленной платформы
PXI*

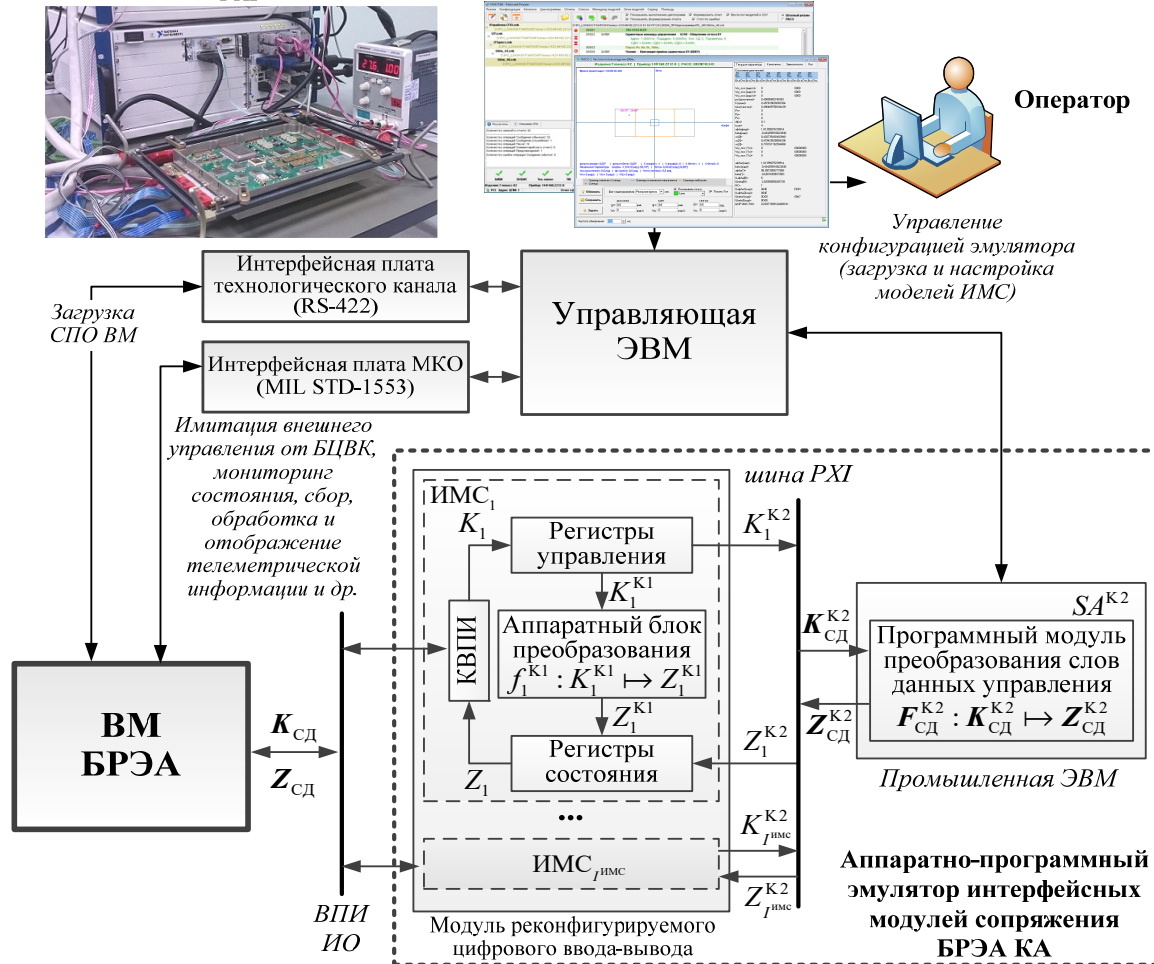


Рис. 1. Обобщенная структурная схема наземного комплекса автономной отработки специального программного обеспечения вычислительного модуля БРЭА с применением технического решения эмулятора интерфейсных модулей сопряжения: ВМ – вычислительный модуль; ИМС – интерфейсный модуль сопряжения; БЦВК – бортовой центральный вычислительный комплекс;

СПО – специальное программное обеспечение; ВПИ ИО – внутриприборный интерфейс информационного обмена; КВПИ – контроллер внутриприборного интерфейса

В процессе функционирования ВМ БРЭА формирует и передает по внутриприборному интерфейсу на соответствующие ИМС слова данных управления: $K_{CD} = \{K_i | i=1, I_{ИМС}\}$, где $I_{ИМС}$ – число ИМС, входящих в состав БРЭА. С точки зрения информационного обмена, подмножества K_i преобразуются в ИМС в подмножества слов данных состояния Z_i . Функция отношения $f_i : K_i \mapsto Z_i$ определяется схмотехнической реализацией и логикой работы соответствующего ИМС [8–10]. Разработанный аппаратно-программный эмулятор ИМС реализует в режиме «жесткого» реального времени совокупность функциональных преобразований $F_{CD} : K_{CD} \mapsto Z_{CD}$, где $Z_{CD} = \{Z_i | i=1, I_{ИМС}\}$, $F_{CD} = \{f_i | i=1, I_{ИМС}\}$.

В качестве технических средств реализации преобразований F_{CD} используются ПЛИС унифицированного модуля реконфигурируемого цифрового ввода-вывода PXI-7813R ($F_{CD}^{K1} : K_{CD}^{K1} \mapsto Z_{CD}^{K1}$) и ресурсы центрального процессора промышленной ЭВМ ($F_{CD}^{K2} : K_{CD}^{K2} \mapsto Z_{CD}^{K2}$) (см. рис. 1) в режиме

временного разделения. На основе ПЛИС разработаны и созданы 12 типов базовых функциональных моделей ИМС для блока управления и блока интерфейсного, входящих в состав бортового комплекса управления КА различного функционального назначения (связи и телевещания, ретрансляции, навигации и др.).

Организацию процессов производства и эксплуатации бортовой радиоэлектронной аппаратуры в течение всего срока активного существования КА (до 15 лет и более) предлагается реализовать посредством сквозного использования информационных технологий в рамках процессов управления данными о создаваемой и эксплуатируемой БРЭА (анализ, накопление, хранение, актуализация и пр.), порождаемых в цифровой форме.

Методическое обеспечение технологических процессов автономной обработки программного обеспечения вычислительного модуля БРЭА КА

Разработанная методика проведения автономного тестирования СПО ВМ на этапе проектирования БРЭА с использованием разработанного эмулятора представлена на рис. 2 блок-схемой ее алгоритма.

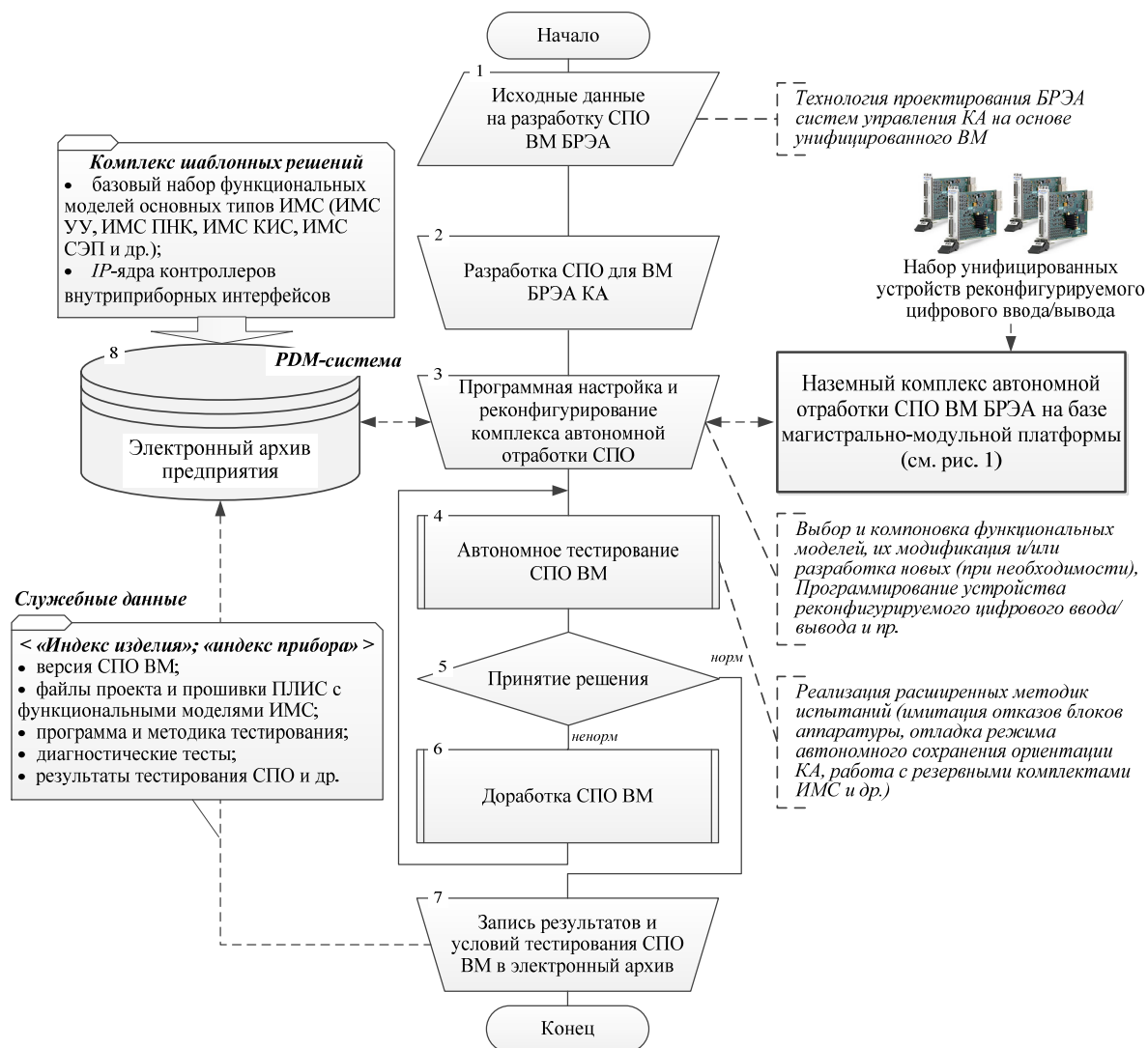


Рис. 2. Блок-схема алгоритма методики применения эмулятора в процессе проектирования БРЭА систем управления КА: PDM – Product Data Management; ВМ – вычислительный модуль; СПО – специальное программное обеспечение; ИМС – интерфейсный модуль сопряжения; УУ – устройства управления; ПНК – преобразователь напряжения в код; КИС – контрольно-измерительная система; СЭП – система электропитания

На основе анализа технического задания на проектируемую аппаратуру (блок управления, блок интерфейсный) формируются исходные данные на разработку СПО ВМ (блок 1). Разработанное СПО

загружается в технологический ВМ наземного комплекса (см. рис. 1) для проведения последующей автономной отработки (блоки 2–3). К ключевым задачам автономной отработки СПО ВМ (блоки 4–6), решаемым на этапе проектирования БРЭА систем управления КА относятся:

- поиск и устранение ошибок в СПО;
- проверка СПО при функционировании ВМ в нештатных ситуациях (переключение на основной/резервный комплект ИМС, частичная или полная неисправность ИМС, отказ системы, узла и/или агрегата КА);
- проверка полноты покрытия тестов посредством искусственного внесения ошибки в СПО и др.

Вариативность исполнения БРЭА для разных КА (различие по числу, составу, внутренней структуре и параметрам ИМС) обуславливают необходимость наличия механизма взаимодействия наземного комплекса с электронным архивом предприятия (блоки 7–8) в целях формирования базы вновь создаваемых функциональных моделей ИМС, а также реализации возможности проведения экспериментальных исследований на основе цифрового двойника функционального поведения соответствующей аппаратуры в течение периода ее эксплуатации на борту КА (до 15 лет и более). Как правило, такая необходимость возникает при отказах каких-либо узлов и/или агрегатов КА и др.

Соответствующие файлы и параметры конфигурации эмулятора ИМС с точки зрения процессов управления данными об изделии относятся к служебным данным, необходимым для выполнения работ по разработке, изготовлению и эксплуатации изделия¹. Дальнейшие изменения, внесенные в конструкторскую документацию на ИМС, в процессе изготовления БРЭА отображаются в соответствующих моделях посредством их программной модификации [9].

Методика применения разработанного эмулятора ИМС на этапе сопровождения эксплуатации БРЭА приведена на рис. 3 в виде блок-схемы ее алгоритма.

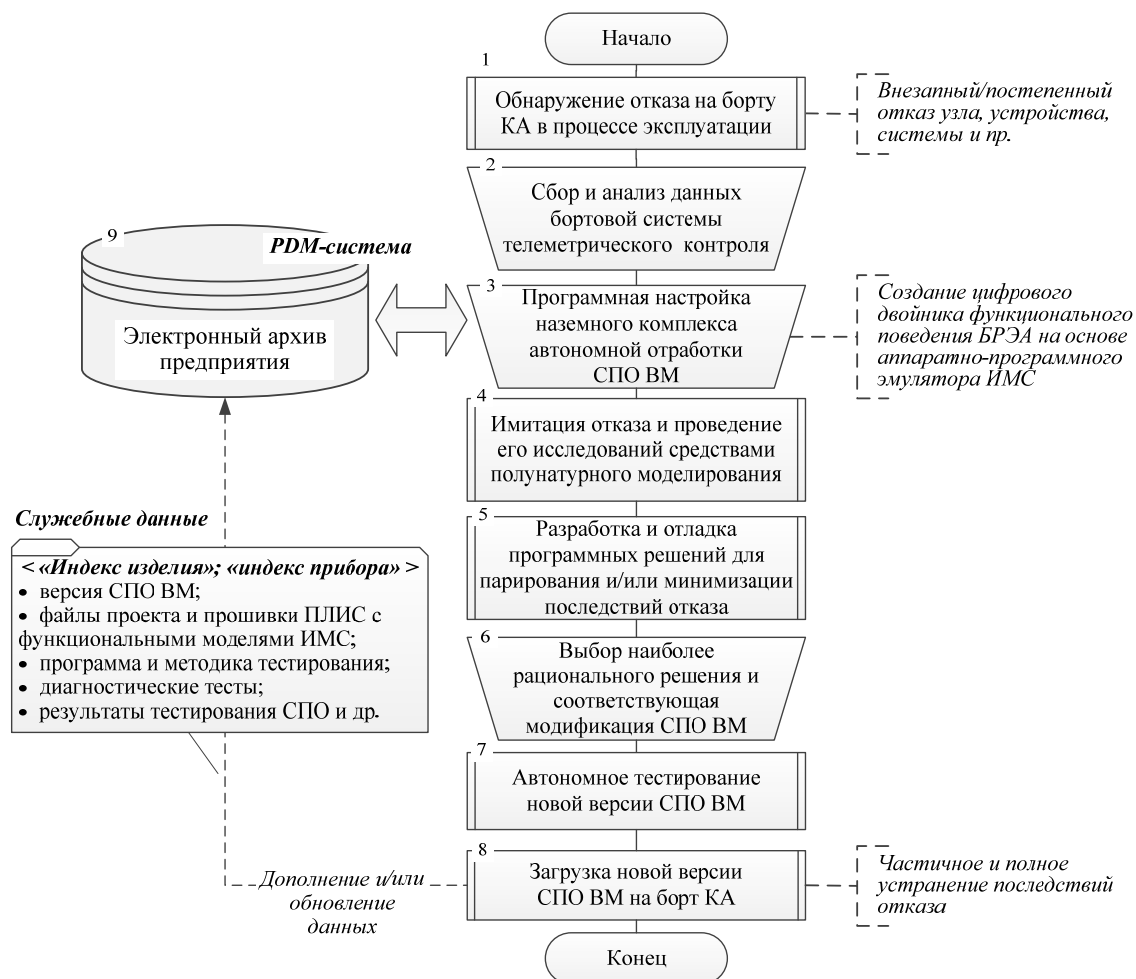


Рис. 3. Блок-схема алгоритма методики применения эмулятора ИМС в процессе эксплуатации БРЭА систем управления КА

¹ ГОСТ Р 58675–2019. Автоматизированная система управления данными об изделии. Общие требования.

Возникновение нештатной ситуации на борту КА (внезапный или постепенный отказ блока БРЭА, функционального узла, системы) нередко приводит к полной или частичной потере его функций (сокращение срока активного существования, снижение объема решаемых целевых задач и др.). В свою очередь, возможность создания в наземных условиях цифрового двойника функционального поведения БРЭА систем управления позволяет в ряде случаев также выполнить парирование возникшей неисправности КА посредством соответствующей модификации СПО ВМ.

В рамках данного подхода на основе результатов анализа данных телеметрии, полученных с КА, выполняется локализация возникшего отказа (блоки 1–2). Соответствующие файлы и параметры конфигурации эмулятора ИМС (служебные данные), размещенные ранее в электронном архиве предприятия (см. рис. 2, блок 7), используются при создании цифрового двойника функционального поведения БРЭА для соответствующего КА с использованием оборудования наземного комплекса (см. рис. 1). Посредством управления функциональными преобразованиями $F_{сд} : K_{сд} \mapsto Z_{сд}$ обеспечивается имитация новых условий функционирования БРЭА в составе КА (блок 3) [9, 11, 12].

Создаваемый цифровой двойник функционального поведения БРЭА применяется для прототипирования решений по устранению и/или минимизации последствий отказа, их тестированию и отладке (блоки 4–7). Модифицированная версия СПО ВМ загружается на борт КА, а соответствующие служебные данные дополняются и/или обновляются в электронном архиве предприятия (блоки 8–9). В дальнейшем, при возникновении отказа БРЭА, шаги методики повторяются.

Таким образом на основе представленных методик реализуются интерационное накопление и поддержание в актуальном состоянии соответствующих данных о БРЭА, эксплуатируемой на борту КА, с возможностью централизованного и оперативного доступа оператора к ним при необходимости.

Результаты

Сравнительный анализ исходного и модифицированного производственных процессов создания БРЭА КА представлен в виде лепестковой диаграммы на рис. 4.

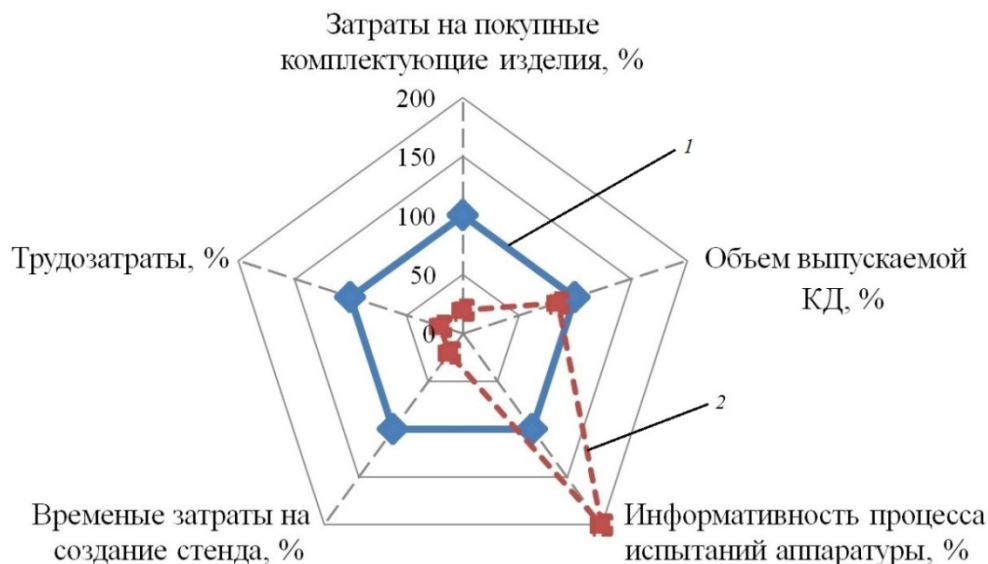


Рис. 4. Сравнительная диаграмма параметров процессов создания бортовой радиоэлектронной аппаратуры бортового комплекса управления КА: 1 – исходный; 2 – модифицированный

Внедрение разработанного эмулятора обеспечило [9]:

- расширение в 2–3 раза перечня отрабатываемых режимов работы БРЭА систем управления КА;
- сокращение в 3 и более раз номенклатуры и объема применяемых технических средств за счет унификации и возможности программного реконфигурирования и многократного использования одного комплекта технологического оборудования (эмулятора ИМС) в процессе проектирования и эксплуатации БРЭА;

- снижение в несколько раз временных и материальных затрат на создание наземного комплекса автономной отработки СПО ВМ посредством исключения необходимости изготовления технологических комплектов ИМС;
- сокращение на 10–15 % объема КД, разрабатываемой и выпускаемой тематическим подразделением;
- уменьшение в несколько раз количества штатных единиц, задействованных при создании и эксплуатации наземного комплекса автономной отработки СПО¹.

Заключение

Внедрение технического решения аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения позволило модернизировать производственные процессы создания и эксплуатации БРЭА систем управления КА по ряду параметров (расширить в 2–3 раза функциональные возможности испытаний, унифицировать технологическую оснастку и др.). В частности, заложенный в основу эмулятора принцип временного разделения аппаратно-программных ресурсов обеспечил снижение в несколько раз затрат на создание соответствующего автоматизированного комплекса наземной отработки. Разработанное новое методическое обеспечение по применению эмулятора в ходе экспериментальных исследований на различных этапах жизненного БРЭА КА включает в себя операции, выполняемые оператором в рамках процедур интеграции в единое информационное пространство предприятия и обеспечивающие реализацию механизмов управления данными об изделии. Это в свою очередь позволяет повысить производительность труда, качество и конкурентоспособность создаваемой продукции за счет сокращения объема и трудоемкости ручных операций, снижения влияния человеческого фактора на воспроизводимость результатов испытаний.

В целом предложенные методики также являются составными частями комплекса мероприятий, реализуемых в рамках программ «Цифровизация проектного и конструкторского направления» и «Цифровая система управления данными» Стратегии цифровой трансформации Акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г.

Список литературы

1. Пичкалев А. В. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2010. Т. 2, С. 515–516.
2. Комаров В. А., Пичкалев А. В. Применение технологий NI FPGA при испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов // Интеллект и наука : тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Железногорск, 28–29 апреля 2011 г.). Красноярск : Центр информации, 2011. С. 146–148.
3. Тюгашев А. А. Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2. С. 9–16.
4. Бубнов О. В., Кремзуков Ю. А., Пчельников В. А. [и др.]. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 3. С. 35–39. doi:10.21293/1818-0442-2017-20-3-35-39
5. Ломаев Ю. С., Иванов И. А., Толстых А. В., Ислентьев Е. В. Применение программно-математических моделей бортовой аппаратуры при разработке бортового программного обеспечения // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 2. С. 166–173. doi:10.31772/2587-6066-2019-20-2-166-173
6. Li J., Xiao M., Kang W., Lv Y. Research on reconfigurable instrument technology of portable test system of missiles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 452, № 12. doi:10.1088/1757-899x/452/4/042097
7. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Vogorovskiy R. V. Automation of spacecraft onboard equipment testing // International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering. 2016. P. 215–217. doi:10.2991/amsee-16.2016.57
8. El-Bayoumi A., Salem M. A., Khalil A., El-Emam E. A new Checkout-and-Testing-Equipment (CTE) for a satellite telemetry using LabVIEW // 2015 IEEE Aerospace Conference. 2015. P. 1–9. doi:10.1109/AERO.2015.7119305

¹ ГОСТ Р 58675–2019. Автоматизированная система управления данными об изделии. Общие требования.

9. Комаров В. А., Семкин П. В. Разработка архитектуры эмулятора интерфейсных модулей сопряжения систем жизнеобеспечения космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 2. С. 228–235. doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-228-235
10. Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2009. Ч. 1. С. 20–22.
11. Прудков В. В. Процедуры автоматизации процесса верификации подсистем блока управления перспективных космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 1. С. 62–64.
12. Патент РФ 2 716 389 РФ, МПК G 05 В 23/00, G 06 F 11/00. Способ построения вычислительного процесса испытаний аппаратуры с мультинтерфейсным взаимодействием / В. В. Прудков ; № 2019108806; заявл. 26.03.2019; опубл. 11.03.2020, Бюл. № 8. 2 с.
13. Сунцов С. Б., Клишкин О. А., Сарафанов А. В. [и др.]. Инженерный анализ при сквозном автоматизированном проектировании радиоэлектронной аппаратуры модульной ракетно-космической техники // Технология машиностроения. 2011. № 5. С. 54–56.
14. Кочура С. Г., Школьный В. Н., Сунцов С. Б. [и др.]. Технологии информационной поддержки жизненного цикла бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. № 3. С. 364–371.
15. Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Опыт цифровой трансформации бизнес-процессов прикладных экспериментальных исследований посредством мультиарендности их ресурсного обеспечения // Информационные технологии. 2021. № 1. С. 41–50.

References

1. Pichkalev A.V. Ground-based debugging complex of onboard electronic equipment. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf. = Reshetnev readings : materials of the XIV International scientific conference*. Krasnoyarsk: Sib. gos. aerokosm. un-t, 2010;2:515–516. (In Russ.)
2. Komarov V.A., Pichkalev A.V. Application of NI FPGA technologies in testing of onboard spacecraft equipment. *Intellect i nauka: tr. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Zheleznogorsk, 28–29 aprelya 2011 g.) = Intellect and Science : tr. XI International Scientific and Practical Conference (Zheleznogorsk, April 28–29, 2011)*. Krasnoyarsk: Tsentr informatsii, 2011:146–148. (In Russ.)
3. Tyugashev A.A. Approach to ensuring fault tolerance of spacecraft based on automation of design of intelligent onboard software. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(2):9–16. (In Russ.)
4. Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Pchel'nikov V.A. et al. Automated workplace for testing and testing of power-generating equipment of the spacecraft power supply system. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2017;20(3):35–39. (In Russ.). doi:10.21293/1818-0442-2017-20-3-35-39
5. Lomaev Yu.S., Ivanov I.A., Tolstykh A.V., Islent'ev E.V. Application of software and mathematical models of on-board equipment in the development of on-board software. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii = Siberian Journal of Science and Technology*. 2019;20(2):166–173. (In Russ.). doi:10.31772/2587-6066-2019-20-2-166-173
6. Li J., Xiao M., Kang W., Lv Y. Research on reconfigurable instrument technology of portable test system of missiles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;452(12). doi:10.1088/1757-899x/452/4/042097
7. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V. Automation of spacecraft onboard equipment testing. *International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering*. 2016:215–217. doi:10.2991/amsee-16.2016.57
8. El-Bayoumi A., Salem M.A., Khalil A., El-Emam E.A. A new Checkout-and-Testing-Equipment (CTE) for a satellite telemetry using LabVIEW. *2015 IEEE Aerospace Conference*. 2015:1–9. doi:10.1109/AERO.2015.7119305
9. Komarov V.A., Semkin P.V. Development of the emulator architecture of interface modules for interfacing life support systems of spacecraft. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii = Siberian Journal of Science and Technology*. 2019;20(2):228–235. (In Russ.). doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-228-235
10. Gornostaev A.I., Kapustin A.N., Zubavichus V.A., Kolesnikov S.M. Application of the trunk-modular principle in the construction of onboard equipment of the onboard control complex of spacecraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIII Mezhdunar. nauch. konf. = Reshetnev readings : materials of the XIII International scientific conference*. Krasnoyarsk: Sib. gos. aerokosm. un-t, 2009;1:20–22. (In Russ.)
11. Prudkov V.V. Procedures for automating the verification process of subsystems of the control unit of advanced spacecraft. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*. 2011;(1):62–64. (In Russ.)

12. Patent Russian Federation 2 716 389 RF, MPK G 05 B 23/00, G 06 F 11/00. *Sposob postroeniya vychislitel'nogo protsessa ispytaniy apparatury s mul'tinterfeysnym vzaimodeystviem = A method for constructing a computational process for testing equipment with multi-interface interaction*. V.V. Prudkov; № 2019108806; appl. 26.03.2019; publ. 11.03.2020, Bull. № 8. 2 s. (In Russ.)
13. Suntsov S.B., Klimkin O.A., Sarafanov A.V. et al. Engineering analysis in end-to-end automated design of radio-electronic equipment of modular rocket and space technology. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of mechanical engineering*. 2011;(5):54–56. (In Russ.)
14. Kochura S.G., Shkol'nyy V.N., Suntsov S.B. et al. Technologies of information support of the life cycle of onboard radio-electronic equipment of rocket and space technology. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Equipment and technologies*. 2017;(3):364–371. (In Russ.)
15. Komarov V.A., Sarafanov A.V., Tumkovskiy S.R. Experience of digital transformation of business processes of applied experimental research through multi-tenancy of their resource provision. *Informatsionnye tekhnologii = Information technologies*. 2021;(1):41–50. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Комаров

доктор технических наук, доцент,
профессор базовой кафедры радиоэлектронной
техники информационных систем,
Сибирский федеральный университет
(Россия, г. Красноярск, Свободный просп., 79);
начальник группы управления проектирования
космических систем, комплексов связи, ретрансляции,
Информационные спутниковые системы
имени академика М. Ф. Решетнева
(Россия, Красноярский край,
г. Железногорск, ул. Ленина, 52)
E-mail: vkomarov@iss-reshetnev.ru

Альберт Викторович Сарафанов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения и электроники,
Сибирский федеральный университет,
(Россия, г. Красноярск, Свободный просп., 79);
директор по развитию бизнеса,
департамент систем управления предприятиями,
Витте Консалтинг (ГК «АЙ-ТЕКО»),
(Россия, г. Москва, ул. Кедрова, 15)
E-mail: sarafanov@i-teco.ru

Vladimir A. Komarov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the base sub-department units
of radioelectronic engineering of information systems,
Siberian Federal University
(79 Svobodnyy avenue, Krasnoyarsk, Russia);
head of the group of the department for the design
of space systems, communication complexes, relaying,
Information Satellite Systems
named after Academician M.F. Reshetnev
(52 Lenina street, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk region, Russia)

Albert V. Sarafanov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of instrumentation and electronics,
Siberian Federal University
(79 Svobodnyy avenue, Krasnoyarsk, Russia);
business development director,
department of enterprise management systems,
Witte Consulting (IG-TEKO Group)
(15 Kedrova street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 21.12.2021

Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2022

Принята к публикации / Accepted 22.02.2022