

**МЕТОД АППАРАТНЫХ МУТАЦИЙ В ОТЛАДОЧНОМ КОМПЛЕКСЕ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ
БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**Д. А. Недорезов¹, В. А. Хабаров¹, Е. А. Абрамов¹, Д. Г. Ощепкова²¹Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: vithabarov@gmail.com²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: Oshchepkovadarya@gmail.com

Предложено решение задачи повышения качества наземных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры перспективных космических аппаратов. Решение основывается на применении авторской методики мутационного тестирования для проведения наземных испытаний, базирующейся на имитации процесса функционирования аппаратуры и программного обеспечения при воздействии факторов космического пространства. Изложены результаты разработки означенной методики и рассмотрены примеры ее применения для наземных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. Предложенный подход базируется на применении в составе эмуляторов конечной аппаратуры реконфигурируемых ПЛИС и позволяет перейти на качественно новый уровень при проведении наземных испытаний. Применение высокоскоростных ПЛИС в составе испытательной аппаратуры позволяет достичь требуемой скорости функционирования и степени реконфигурируемости при имитации внешних дестабилизирующих факторов. За счет этого осуществляется имитация функционирования аппаратных модулей в реальных условиях эксплуатации. При применении разработанного метода аппаратных мутаций осуществляется реконфигурирование систем непосредственно в процессе тестирования конечной аппаратуры, что позволяет осуществлять имитационное моделирование типичных сбоев и отказов, возникающих в критических узлах электронной аппаратуры космических аппаратов, с максимальным приближением к реальным условиям эксплуатации. Имитация происходит путем внесения мутационных операторов в описание функциональных узлов аппаратуры с последующей генерацией ПЛИС-проектов, реализуемых в комплексе. Разработаны алгоритмы проведения испытаний согласно предложенной методике, выделены основные этапы тестирования, включающие процесс формализации поведения каналов ввода-вывода прибора при конкретной неисправности, формирование журнала регистрации неисправностей и разработку кодов описания аппаратуры для имитации алгоритмов функционирования отладочного комплекса. В рамках разработанной методики помимо аппаратуры мутации подвергается и бортовое программное обеспечение встраиваемых микропроцессорных систем. Для применения разработанного метода реализован и введен в промышленную эксплуатацию лабораторный отладочный комплекс. Изложены результаты разработки комплекса и способов его применения для специальных испытаний радиоэлектронной аппаратуры. Изложены результаты испытаний комплекса и основные пути развития предлагаемого подхода.

Ключевые слова: мутационное тестирование, языки описания аппаратуры, отработка, радиоэлектронная аппаратура, ПЛИС, отладочный комплекс.

Vestnik SibGAU
2014, No. 4(56), P. 98–101**THE METHOD OF HARDWARE MUTATION
FOR DEBUGGING COMPLEX ONBOARD SPACECRAFTS EQUIPMENT**D. A. Nedorezov¹, V. A. Khabarov¹, E. A. Abramov¹, D. G. Oshchepkova²¹Siberian Federal University
79, Svobodnyi Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: vithabarov@gmail.com²JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: Oshchepkovadarya@gmail.com

The solution to the problem of increasing the quality of ground tests of spacecrafts onboard radio-electronic equipment is proposed. The solution is based on the use of the author's technique of mutation testing for ground tests. It is based on the simulation of the process of functioning hardware and software under the influence of space factors.

The results of the development of this technique and examples of its applying for ground tests of spacecrafts onboard radio-electronic equipment are presented. The proposed approach is based on the use in composition of emulators reconfigurable FPGA. It allows to go to a new quality of ground tests. Application of high-speed FPGA in test equipment allows to achieve a desired speed of functioning and degree of reconfigurability. It allows to simulate functioning of the hardware modules in actual operating conditions. Imitation occurs by introducing the mutation operators in the description of the functional units of the equipment. An algorithm for ground tests and basic stages of testing, which including the process of formalizing the behavior of channels I/O device at each fault is developed. In the framework of the developed technique, in addition to equipment, the mutations are exposed onboard software of embedded microprocessor systems. Laboratory debugging complex for the application of this method is implemented and put into commercial operation. The results of the development of this debugging complex, methods and ways of it applying in special testing of radio-electronic equipment are presented. The results of testing of the laboratory debugging complex and general ways of introduced approach advance are specified.

Keywords: mutation testing, hardware description languages, debug, radio-electronic equipment, FPGA, debugging complex.

Введение. Развитие ракетно-космической техники ставит перед разработчиками бортовой аппаратуры космических аппаратов жесткие требования: улучшение габаритно-массовых характеристик, увеличение функциональных возможностей аппаратуры и повышение сроков ее активного существования. Для обнаружения и устранения возможных ошибок и недоработок требуются сложные и тщательные наземные испытания. Такие испытания требуют больших временных затрат, что при растущих объемах производства критически влияет на экономическую эффективность проектов. Для сокращения временных затрат на этапах отработки и увеличения вероятности обнаружения неисправностей создаются системы наземных испытаний. Как правило, программно-аппаратные комплексы для наземных испытаний реализуются на базе готовых решений, например на основе платформ ADLINK или National Instruments [1; 2]. При этом для имитации отдельных частей тестируемой аппаратуры применяются реконфигурируемые однокристальные модули, реализуемые с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Поскольку логика функционирования ПЛИС может быть представлена на языке описания аппаратуры, то это позволяет вносить программные корректировки и применять для отладки оборудования методы тестирования, аналогичные тем, что используются и при программировании с применением универсальных языков [3].

Такой метод получил свою реализацию в наземном отладочном комплексе радиоэлектронной аппаратуры (НОК РЭА) – программно-технической системе реального времени, которая включает моделирование объектов отработки и испытаний (см. рисунок) [4; 5].

Метод основан на имитации реальной бортовой РЭА специальными отладочными модулями. Это достигается при помощи контрольно-испытательной аппаратуры отладочного комплекса, эмулирующей процесса обмена в каналах ввода-вывода, соединяющих объект испытаний с окружающей средой, имитирующих реальные условия его штатной эксплуатации посредством применения системы жесткого реального времени.

В состав комплекса включены цифроаналоговые и аналогово-цифровые преобразователи, модули цифрового ввода-вывода, специализированные интерфейсные

контроллеры, осциллографы, устройства коммутации сигналов, СВЧ-генераторы и т. п.



Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

Аппаратура, требующая высокой скорости функционирования и степени реконфигурируемости, реализуется на программируемых логических интегральных схемах. Реализация модели РЭА на ПЛИС позволяет поддерживать такой же уровень скоростей, как и испытываемая аппаратура. Обеспечить высокие скорости может также аппаратное макетирование аппаратуры для проведения тестирования и отладки, т. е. создание макета прибора, частично или полностью повторяющего целевую аппаратуру. Но используемый ПЛИС-процесс гораздо более гибкий и дешевый в сравнении с аппаратным макетированием [6; 7].

При тестировании программного и аппаратного обеспечения важно обеспечить высокое качество создаваемых тестов, их способность покрывать множество некорректных ситуаций, которые могут возникать не только в следствие ошибок разработчиков, но и в ходе эксплуатации [8]. Для оценки качества тестов и покрытия ими различных ошибок используются различные подходы, среди которых можно выделить разработанный авторами метод аппаратного мутационного тестирования [9], основанный на внесении в код программы некоторых изменений, которые называются мутациями. Для их внесения используются

мутационные операторы, имитирующие типичные сбои в аппаратуре целевого назначения (например, выполнение неправильной команды процессором или выход из строя функционального модуля) [10]. В разрабатываемую конфигурацию Р вносят изменения (мутации), т. е. искусственно создают конфигурации-мутанты Р1, Р2, Р3 и т. д. Затем программа Р и ее мутанты тестируются на одном и том же наборе тестов. Если на этом наборе тестов подтверждается правильность программы Р и выявляются все ошибки в программах-мутантах, то набор тестов считается соответствующим мутационному критерию, а программа Р объявляется правильной. Если в некоторых мутантах не были выявлены все мутации, то набор тестов рассматривается как недостаточный и требует расширения [11–13].

Мутации в данном случае делятся на имитирующие аппаратные неисправности и имитирующие ошибки управляющего ПО бортовой РЭА. Дело в том, что при возникновении как аппаратной, так и программной ошибки в бортовом приборе, его каналы ввода-вывода, связывающие его с остальной бортовой или наземной аппаратурой (в случае наземной отработки), непременно отреагируют на наличие неисправности и изменят свое поведение. Этот факт незаменим для диагностики неисправностей: по изменениям поведения каналов обмена данными возможно определить наличие неисправности и ее причину.

Способ мутационного тестирования бортовой РЭА заключается в том, что на языке описания аппаратуры создают проект ПЛИС, имитирующий реальную РЭА и содержащий намеренно внесенные неисправности [14].

Например, в ходе штатной эксплуатации бортовой аппаратуры радионавигации (АРН) наблюдался сбой – «Попадание ПО прибора в кольцо ошибок», приводивший к прекращению обмена АРН с бортовым центральным вычислительным комплексом (БЦВК) по каналу мультиплексного обмена (МКО) [15]. Данный отказ, как и прочие неисправности, был воплощен в виде мутации с целью проведения тестирования аппаратуры в условиях нештатной ситуации. Таким образом, при тестировании БЦВК в части взаимодействия с АРН имитировали отключение обмена по МКО, сигналы о состоянии электропитания, активности каналов и показания «статуса» прибора. Поскольку данные сигналы имеют цифровую форму, они были реализованы на наземных отладочных модулях, содержащих имитационные модели целевой аппаратуры. Подобные исследования были проведены для повышения надежности функционирования бортовой РЭА в нештатных ситуациях.

При тестировании, с целью повышения результативности, данные о реальных нештатных ситуациях и неисправностях накапливались в памяти комплекса. Для решения этой задачи при наземных испытаниях формировался журнал, в который вносили информацию о неисправностях бортовой РЭА.

Заключение. Разработанный механизм обнаружения неисправностей состоит из нескольких этапов. На первом этапе решается задача формализации поведения каналов ввода-вывода прибора при конкретной неисправности и формирование журнала регистрации

неисправностей (в противном случае необходимо опрашивать инженеров, занимавшихся устранением неисправностей, и анализировать документацию). Затем разрабатываются коды описания аппаратуры, которые реализуют имитационные алгоритмы НОК для описания поведения каналов ввода-вывода прибора при неисправности.

В процессе выполненных работ и проведенных испытаний разработанного комплекса и метода мутационного тестирования получены результаты, подтверждающие возможность применения разработанного метода как для тестирования отладочных комплексов РЭА путем разработки тестового покрытия, так и для тестирования бортовой аппаратуры. Разработанный программно-аппаратный комплекс и метод позволит сократить сроки тестирования, добиться высокой достоверности тестов и увеличить надежность бортовой РЭА.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы (код проекта 14.578.21.0021).

Acknowledgements. This work was financially supported by the federal target program (project code 14.578.21.0021).

Библиографические ссылки

1. Гуров В. Аппаратные средства Compact PCI производства ADLINK Technology // Современные технологии автоматизации. 2011. № 2. С. 30–36.
2. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. СПб.: ДМК Пресс, 2011.
3. Непомнящий О. В., Легалов А. И., Рыженко И. Н. Технология архитектурно-независимого, высокоуровневого синтеза сверхбольших интегральных схем // Доклады АН ВШ РФ / НГТУ. 2014. Т. 57, № 3. С. 35–39.
4. Недорезов Д. А., Непомнящий О. В., Пичкалев А. В., Красненко С. С. Применение ПЛИС для моделирования логики функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1 (53). С. 133–136.
5. Красненко С. С., Недорезов Д. А., Кашкин В. Б., Пичкалев А. В. Магистрально-модульная система для отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 133–136.
6. Непомнящий О. В., Легалов А. И., Сиротинина Н. Ю. Маршруты высокоуровневого синтеза сверхбольших интегральных схем // Журнал Сиб. федер. ун-та. Серия «Техника и технологии». 2014. № 6. С. 674–684.
7. Непомнящий О. В., Вейсов Е. А., Правитель А. С. Однокристалльные системы с динамической реконфигурацией в радиоэлектронной аппаратуре специального назначения // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 5. С. 25–29.
8. Непомнящий О. В., Скотников Г. А., Хабаров В. А., Мадудов М. В. Сверхбольшие интегральные схемы. Проблемы проектирования // Вопросы современной науки и практики / Ун-т им. В. И. Вернадского. 2009. № 6(20). С. 166–173.

9. Методология мутационного тестирования для наземных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов / Д. А. Недорезов [и др.] // Системы и средства информатики. 2014. № 1 (24). С. 75–78.

10. Непомнящий О. В., Шайдулов В. В., Вейсов Е. А. Проблемы и решения проектирования микропроцессорных модулей навигационной аппаратуры пользователей ГЛОНАСС // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4(25). С. 14–18.

11. Filip Van Laenen Mutation testing // *Overload Journal*. 2012. № 108. С. 16–22.

12. DeMillo R. A., Lipton R. J., Sayward F. G. Hints on test data selection: Help for the practicing programmer // *IEEE Computer*. 1978. С. 34–41.

13. Offutt A. J., Lee S. D. An empirical evaluation of weak mutation // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1994. № 20. С. 337–344.

14. Формальная верификация при проектировании сверхбольших интегральных схем / О. В. Непомнящий [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2014. № 4. С. 87–79.

15. Способы реализации имитаторов радионавигационных сигналов / О. В. Непомнящий [и др.] // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1(53). С. 30–34.

References

1. Gurov V. [Compact PCI hardware production ADLINK Technology]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2011, no. 2, p. 30–36 (In Russ.).

2. Travis J., Kring J. *LabVIEW dlya vseh* [LabVIEW for Everyone]. St.Petersburg, DMK Press, 2011.

3. Nepomnyashchiy O. V., Legalov A. I., Ryzhenko I. N. [Technology architecture-independent, high-level synthesis of VLSI]. *Doklady AN VSh RF*, 2014, vol. 57, no. 3, p. 35–39. (In Russ.).

4. Nedorezov D. A., Pichkalev A. V., Krasnenko S. S., Nepomnyashchiy O. V. [Application FPGA for modelling of logic of functioning of onboard radio-electronic equipment of spacecrafts]. *Vestnik SibGAU*. 2014, no. 1 (53), p. 133–136 (In Russ.).

5. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A., Kashkin V. B., Pichkalev A. V. [Bus-modular system for testing the onboard radio-electronic equipment]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2(48), p. 133–136 (In Russ.).

6. Nepomnyashchiy O. V., Legalov A. I., Sirotina N. J. [High-Level Design Flows for VLSI Circuit]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii*. 2014, no. 6, p. 674–684 (In Russ.).

7. Nepomnyashchiy O. V., Veysov E. A., Pravitel' A. S. [The dynamically reconfigurable systems on chip for special-purpose radio-electronic equipment]. *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*. 2014, no. 5, p. 25–29 (In Russ.).

8. Nepomnyashchiy O. V., Skotnikov G. A., Khabarov V. A., Madudov M. V. [Very Large Scale Integration. Designing Problems]. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo*. 2009, vol. 20, no. 6, p. 166–173 (In Russ.).

9. Nedorezov D. A., Nepomnyashchiy O. V., Legalov A. I., Ankudinov A. V., Krasnenko S. S. [Mutation test methodology for onboard spacecrafts radioelectronic equipment ground test]. *Sistemy i sredstva informatiki*. 2014, vol. 24, no. 1, p. 75–78 (In Russ.).

10. Nepomnyashchiy O. V., Shajdurov V. V., Veysov E. A. [Problems and solutions of designing microprocessor modules navigation equipment GLONASS users]. *Vestnik SibGAU*. 2009, vol. 25, no. 4, p. 14–18 (In Russ.).

11. Filip Van Laenen. Mutation testing. *Overload Journal*. 2012, no. 108, p. 16–22.

12. DeMillo R. A., Lipton R. J., Sayward F. G. Hints on test data selection: Help for the practicing programmer. *IEEE Computer*. 1978, p. 34–41.

13. Offutt A. J., Lee S. D. An empirical evaluation of weak mutation. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1994, no. 20, p. 337–344.

14. Nepomnyashchiy O. V., Komarov A. A., Titovskaya T. S., Leonova A. V. [Formal verification in the design of VLSI]. *Vestnik KrasGAU*. 2014, no. 4, p. 87–79 (In Russ.).

15. Nepomnyashchiy O. V., Krasnenko S. S., Pichkalev A. V., Nedorezov D. A., Lapin A. Yu. [Methods of realization of simulators of satellite radionavigation systems]. *Vestnik SibGAU*. 2014, no. 1(53), p. 30–34. (In Russ.).

© Недорезов Д. А., Абрамов Е. А.,
Хабаров В. А., Ощепкова Д. Г., 2014