10. The Vacuum Technology Book Volume II. Germany, publ. Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013. URL: http://www.norm.gr/documents/Vacuum-Technology-Book-II-Part-2.pdf (дата обращения: 5 December 2013).

11. Романовский Р. К. Лекции по уравнениям математической физики. Уравнения колебаний и диффузии : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2004. 102 с.

12. Дмитриев Е. А. Явления переноса массы в примерах и задачах : учеб. пособие. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 120 с.

13. Мартинсон Л. К., Малов Ю. И. Дифференциальные уравнения математической физики : учебник для студентов вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. 368 с.

14. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. М. : Мир, 1985. 384 с.

15. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник. В 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 1986. Кн. 1. 488 с; кн. 2. 352 с.

References

1. Afanasev V. A. [et al.] *Eksperimental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (Experimental verification of spacecraft). Edited by Kholodkov N. V. Moscow, MAI publ., 1994. 412 p.

2. Gardymov G. P., Parfenov B. A., Pchelincev A. V. *Tekhnologiya raketostroeniya* (Rocket technology). St. Petersburg, Spetsial'naya literatura publ., 1997. 320 p.

3. Gurvich A. K., Ermolov I. N., Sazhin S. G. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Kn. 1. Obshhie voprosy* (Nondestructive testing. Book 1. Common questions). Edited by V.V. Suhorukov. Moscow, Higher School Publ., 1992. 416 p.

4. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A., Filimonov A. S. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* (Technology of production of liquid rocket engines). Moscow, MSTU Publ., 2008. 380 p.

5. Belokur I. P., Kovalenko V. A. *Defektoskopiya materialov i izdeliy* (Flaw detection of materials and products). Kiev, Technology Publ., 1989. 192 p.

6. GOST 28517-90. *Kontrol' nerazrushayushchiy. Mass-spektrometricheskiy metod techeiskaniya. Obshchie trebovaniya* (Nondestructive testing. Mass spectrometry leak detection. General requirements). Moscow, Standartinform, 2005.

7. Testoedov N. A. [et al.] *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* (Production technology of spacecraft.). Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009. 352 p.

8. Sheshin E. P. *Vakuumnye tehnologii* (Vacuum technology). Dolgoprudnyy, Intellekt Publ., 2009. 504 p.

9. Tarasevich R. M. *Metody i sredstva proverki germetichnosti uzlov, otsekov i sistem letatel'nyh apparatov* (Methods and tools for leak testing nodes, compartments and aircraft systems). Moscow, MAI, 1974. 145 p.

10. The Vacuum Technology Book Volume II. Germany, publ. Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013. : Available at: http://www.norm.gr/documents/Vacuum-Technology-Book-II-Part-2.pdf (accessed 5 December 2013).

11. Romanovskij R. K. *Lektsii po uravneniyam matematicheskoy fiziki. Uravneniya kolebaniy i diffuzii* (Lectures on Differential Equations. Fluctuations and the diffusion equation). Omsk, OmGTU Publ., 2004. 102 p.

12. Dmitriev E. A. *Yavleniya perenosa massy v primerakh i zadachakh* (Mass transfer phenomena in the examples and problems). Moscow, Publ. MUCTR of D.I. Mendeleev, 2005. 120 p.

13. Martinson L. K., Malov Ju. I. *Differencial'nye uravnenija matematicheskoj fiziki* (Differential equations of mathematical physics). Moscow, MGTU Publ., 1996. 368 p.

14. Farlou S. *Uravneniya s chastnymi proizvodnymi dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Partial Differential Equations for Scientists and Engineers). Moscow, Mir Publ., 1985. 384 p.

15. *Pribory dlja nerazrushajushhego kontrolja materialov i izdelij. Spravochnik*. (Instruments for nondestructive testing of materials and products. Handbook), edited by V. V. Kljuev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986.

© Кишкин А. А., Колчанов И. П.,
Делков А. В., Ходенков А. А., 2014

УДК 629.78.054:621.396.018

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОГИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. А. Недорезов[1], А. В. Пичкалев[1], С. С. Красненко[1], О. В. Непомнящий[2]

[1]ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: nd@iss-reshetnev.ru
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: 2955005@gmail.com

Описаны способ и устройство для микропрограммной отработки и испытаний радиоэлектронной аппаратуры, основанные на эмуляции логики функционирования объекта испытаний в программируемых логических

интегральных схемах. Рассмотрены способы программной и аппаратной имитации отсутствующих составляющих процесса испытаний. Исследованы особенности разработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с применением технологий имитации аппаратуры. Описан подход к разработке программного обеспечения для поддержки процесса автоматизации отработки и испытаний составляющих космических аппаратов. Предложен инновационный метод мутационного тестирования радиоэлектронной аппаратуры с применением моделирования на основе программируемых логических интегральных схем и языков описания аппаратуры.

Ключевые слова: отработка, испытания, радиоэлектронная аппаратура, моделирование, эмуляция, ПЛИС, наземный отладочный комплекс.

APPLICATION FPGA FOR MODELLING OF LOGIC OF FUNCTIONING OF SPACECRAFT ONBOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

D. A. Nedorezov[1], A. V. Pichkalev[1], S. S. Krasnenko[1], O. V. Nepomnuashy[2]

[1]JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: nd@iss-reshetnev.ru
[2]Siberian federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. E-mail: 2955005@gmail.com

The way and the device for microprocessor working off and tests of the radio-electronic equipment, the logicians of functioning of object of tests based on FPGA are described. Software and hardware methods of imitation of test process missing parts are considered. Development features of spacecraft onboard radio-electronic equipment with hardware emulation technologies are investigated. The approach to working out of the software for maintenance of process of automation of working off and tests of making space vehicles is described. The innovational method of Hardware mutation testing with apply of field-programmable gate arrays and hardware description languages is offered.

Keywords: debug, test, radio-electronic equipment, modeling, emulation, FPGA, terrestrial debugging complex.

В современных условиях в отечественной космической промышленности крайне актуальным становится вопрос обеспечения надежности. Для предотвращения и парирования нештатных ситуаций и отказов в ходе эксплуатации космических аппаратов (КА) необходимо особое внимание и уделять наземной отработке и испытаниям, в первую очередь, в области космического приборостроения. В то же время все более жесткие требования предъявляются к срокам выпуска готовой продукции, ввиду чего особенно острой становится проблема скорейшего получения бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и ее лабораторных прототипов для отработки и испытаний ввиду большого объема работ, проводимых разными подразделениями разработчиков. Средством преодоления данных проблем является моделирование объектов отработки и их частей.

Современные методы моделирования РЭА можно условно разделить на программные, аппаратные и аппаратно-программные.

Программные методы дают широкие возможности для математического моделирования самых разнообразных процессов. Но надежность такого моделирования определяется точностью алгоритмов используемых моделей, которые можно проверить только путем длительной эксплуатации и сравнения с функционированием реальной аппаратуры. Процесс мало того, что длительный, так еще и не слишком предсказуемый. Усугубляется это еще и тем, что операционные системы, которые обеспечивают работу программных сред моделирования, как правило, не поддерживают так называемое реальное время в составе отработочного комплекса, добавляя нюансы собственного функционирования в особенности его работы.

Аппаратные средства, способные функционировать на такой же высокой скорости, как и испытываемая аппаратура, не имея переменной составляющей, не предоставляют необходимой гибкости при конфигурировании. Особенно это сказывается при обнаружении «незадокументированных возможностей» отрабатываемой РЭА, когда срочно требуется поменять условия экспериментальной отработки и изменить условия моделирования.

Наибольшее распространение получили аппаратно-программные средства. Причем среди всех методов моделирования наметилась тенденция на создание многофункциональных сред, позволяющих максимально охватывать процессы отработки и испытаний РЭА. Это обусловлено потребностью в максимальной совместимости составных частей испытаний, что минимизирует трудозатраты и ускоряет отработку.

Также современная отработочная система должна включать хорошо развитое средство формализации логики – максимально простой и функциональный язык описания алгоритмов управления процессом отработки или испытаний. А аппаратная часть, в свою очередь, должна быть как можно более гибкой.

Всем вышеперечисленным условиям отвечает разработанная в ОАО «ИСС» технология, применяемая в наземном отладочном комплексе радиоэлектронной

аппаратуры (НОК РЭА) (рис. 1) – программно-технической системе реального времени, которая включает моделирование объектов отработки и испытаний [1]. В основе технологии моделирования лежит обеспечение функционирования программного обеспечения (ПО) в реальном процессорном модуле РЭА с имитацией для него реальных условий эксплуатации в составе КА. Это достигается эмуляцией обмена в реальном времени по каналам ввода-вывода, через которые объект испытаний соединен с окружающей средой.

Специальная аппаратура отладочного комплекса имитирует процесс штатной эксплуатации [2]. В ее состав входят модули цифрового ввода-вывода, цифроаналоговые преобразователи, аналогово-цифровые преобразователи, специализированные интерфейсные контроллеры, устройства коммутации сигнала, осциллографы, СВЧ-генераторы и т. д. Причем все это оборудование изготовлено в международных магистрально-модульных стандартах PCI или Compact-PCI/PXI и выпускается серийно, что исключает проблемы совместимости. Высокоскоростные каналы, которые невозможно эмулировать программно, реализуются в специализированных устройствах, содержащих в своем составе программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

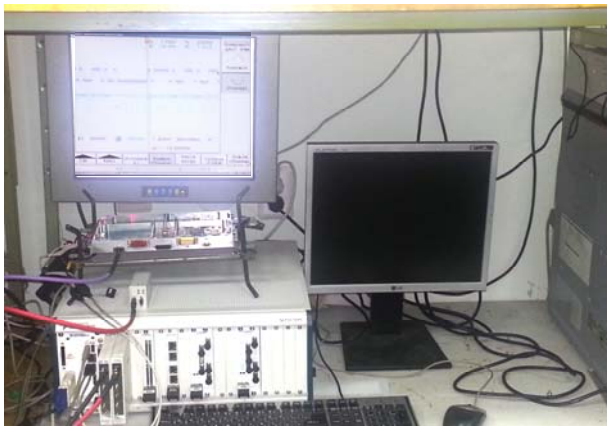

Рис. 1. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

Основным вычислительным и управляющим ядром системы является промышленный или персональный компьютер, функционирующий под управлением автоматизированной системы обработки информации и управления (АСОИУ) [3; 4]. АСОИУ комплекса реализована в среде графической разработки ПО National Instruments LabVIEW. Такой подход позволяет выполнять разработку архитектуры и ПО испытательного комплекса, а также выполнять реконфигурацию встроенных однокристальных систем на базе программируемых логических интегральных схем. Таким образом, осуществляется адаптация испытательного комплекса на уровне аппаратных средств для решения текущих задач.

Реконфигурируемая аппаратная часть реализуется на ПЛИС. Логические емкости этих микросхем позволяют реализовывать сложнейшие устройства, микропроцессорные системы на кристалле, счетчики, таймеры, генераторы импульсов, измерители частотно-временных параметров и импульсных последовательностей, аппаратные вычислительные и коммуникационные устройства и др.

Использование IP-ядра реальной ПЛИС РЭА для эмуляции обмена по соответствующему интерфейсу позволяет попутно провести своеобразное макетирование схемы до изготовления реальных аппаратных средств, что выявляет возможные ошибки как исходных данных на проект ПЛИС, так и их интерпретации разработчиком проекта.

Таким образом, при использовании специальных модулей с ПЛИС в качестве базы для интерфейсов испытательного комплекса остается только формализовать логику поведения объекта контроля. И тогда специальные программные отработочные испытания на базе реализуемых в НОК РЭА математических моделей функциональных блоков, интерфейсных модулей, внешних устройств и приборов, обеспечивающие проверки на все предполагаемые ситуации, способны имитировать различные ситуации работы РЭА для исследования всевозможных отказов, в том числе и проводить анализ ее поведения в различных аварийных ситуациях в процессе эксплуатации КА.

Простота разработки и эффективность НОК РЭА достигаются не только особенностями аппаратной части испытательных комплексов, но и упрощением разработки специального программного обеспечения для них. Данное ПО разрабатывается как на стандартных языках высокого уровня (C++, Pascal и т. п.), так и в LabVIEW. Это позволяет привлекать к разработке ПО как профессиональных программистов, так и непосредственно самих разработчиков РЭА и в значительной мере облегчает их взаимодействие между собой.

Код, разработанный, например, на языке C++, может быть вызван как функция в LabVIEW. Также ПО текстовых языков может взаимодействовать с LabVIEW через файловый обмен. Кроме того, программисты могут разрабатывать типовые конфигурации кодов, которые будут дорабатываться инженерами-конструкторами, обладающими большим пониманием аппаратной части НОК и объектов контроля. Таким образом, происходит поднятие уровня интерграции разработки еще на ступень вверх. Программисты создают объекты, из которых другие инженеры смогут создавать ПО собственной разработки [5].

В состав LabVIEW входит набор функций для работы с ПЛИС (LabVIEW FPGA) и для работы в режиме реального времени (LabVIEW Real time). То есть система объединяет в себе средства разработки ПО высокого уровня, средства программирования ПЛИС и средства реализации режима реального времени. Программное обеспечение делится в этом случае на две составляющих: host и target. Host – управляющая программа, служащая интерфейсом между пользователем и ПЛИС; этот программный модуль располагается в памяти управляющей электронно-вычислительной машины. Target – программный модуль, реализуемый в ПЛИС и управляемый из host. В host реализуется

часть ПО, которая не требует реального времени, работает под управлением обычной операционной системы и реализует основной алгоритм программы. В target же реализованы алгоритмы, к которым предъявляются требования реальных промежутков времени [6].

Поскольку конфигурирование ПЛИС осуществляется при помощи формализованных языков описания аппаратуры, т. е. фактически на языках программирования, следовательно, появляется возможность применения в процессе отработки и испытаний РЭА технологий, традиционно применяемых для тестирования ПО. Для проверки качества тестов и анализа покрытия ими различных некорректных ситуаций используются различные подходы, среди которых можно выделить разрабатываемый метод мутационного тестирования, который основан на включении в код программы на языке описания аппаратуры соответствующих изменений (программных мутаций) [7]. Результаты этих изменений происходят при использовании мутационных операторов, имитирующих типичные ошибки программистов или воздействие окружающей среды на ПЛИС. Такими мутациями могут быть, например, использование неправильной операции или имитация тиристорного эффекта при воздействии ионизирующего облучения. В разрабатываемый код P вносят изменения (мутации), т. е. искусственно создают программы-мутанты P1, P2, P3 и т. д. Затем программа P и ее мутанты тестируются на одном и том же наборе тестов. Если на этом наборе тестов подтверждается правильность программы P и выявляются все ошибки в программах-мутантах, то набор тестов соответствует мутационному критерию, а программа P объявляется правильной. Если в некоторых мутантах не были выявлены все мутации, то набор тестов рассматривается как недостаточный и требует расширения.

Задачи моделирования высокоскоростной аппаратуры разрешимы и с применением других аппаратно-программных средств, имитирующих логику функционирования разрабатываемой аппаратуры. Например, можно применить микроконтроллеры, также функционирующие на аппаратных скоростях. Но микроконтроллеры все же обладают меньшей гибкостью и не в состоянии изменять структуру как ПЛИС. Микроконтроллеры содержат неконфигурируемые аппаратные составляющие, которые могут стать избыточными при испытаниях, в то же время может не хватить нужных элементов. В ПЛИС же возможно реализовать только те устройства, которые необходимы для стоящих задач.

Технология НОК РЭА является современным решением, позволяющим проводить качественные испытания и отработку бортовой РЭА для КА. Технология применена на практике при создании испытательных комплексов для аппаратуры бортовых комплексов управления всех современных спутников ОАО «ИСС».

Библиографические ссылки

1. Пичкалев А. В. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы X Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. С. 515–516.

2. Магистрально-модульная система для отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры / С. С. Красненко, Д. А. Недорезов, В. Б. Кашкин, А. В. Пичкалев // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 133–136.

3. А. с. о регистрации программы для ЭВМ № 2012660356. Автоматизированная проверка работоспособности модуля релейной коммутации сигнала с регистром изолированного цифрового ввода PCI-7256 / Д. А. Недорезов, А. В. Пичкалев ; дата рег. 16.11.2012.

4. А. с. о регистрации программы для ЭВМ № 2013617243. Автоматизированная проверка работоспособности модуля цифрового ввода-вывода PCI-7396 / Д. А. Недорезов, А. В. Пичкалев ; дата рег. 06.08.2013.

5. Непомнящий О. В., Алекминский С. Ю. Проблемы верификации проекта при сквозном проектировании вычислительных систем на кристалле // Нано- и микросистемная техника/ 2010. № 9 (122). С. 4–7.

6. Недорезов Д. А. Разработка программного обеспечения для испытательных комплексов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Интеллектуальный потенциал XXI века – ступени познания : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. / Центр развития научного сотрудничества. Новосибирск, 2012. С. 182–187.

7. Непомнящий О. В., Хныкин А. В., Мамбеталиев Н. А. Однокристальные вычислительные системы ответственного применения // Исследования наукограда. 2013. № 2 (4) С. 54–57.

References

1. Pichkalev A. V. [The terrestrial debugging complex for onboard radio-electronic equipment]. *Materialy 10 Mezhdunarodnoj nauchoj konferencii "Reshetnevskie chtenija"* (Proceedings 10th International scientific conference "Reshetnev readings"). Krasnoyarsk, 2010, p. 515–516.

2. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A., Kashkin V. B., Pichkalev A. V. *Vestnik SibGAU.* 2013, no. 2 (48), p. 133–136.

3. Nedorezov D. A., Pichkalev A. V. Certificate of software registration № 2012660356, 16th November 2012.

4. Nedorezov D. A., Pichkalev A. V. Certificate of software registration №2013617243, 6th August 2013.

Nepomnyashcy O. V., Alekminsky S. U. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika.* Moscow, 2010, no. 9 (122), p. 4–7.

5. Nedorezov D. A. [Software development for terrestrial debugging complexes of onboard radio-electronic equipment]. *Intellektual'nyj potencial XXI veka – stupeni poznanija: materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* (Proceedings 10th International scientific conference "Intellectual potential of the 21st century – level of cognition"). Novosibirsk, 2012, p. 182–187.

6. Nepomnyashcy O. V., Hnukin A. V., Mambetaliev N. A. *Issledovanya Naukograda*. 2013, no. 2 (4), p. 54–57.

© Недорезов Д. А., Пичкалев А. В.,
Красненко С. С., Непомнящий О. В., 2014