

## МЕТОД ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ВНЕСЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В АЛГОРИТМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

© 2024

- Д. А. Недорезов** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительная техника» Института космических и информационных технологий; Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; [Nedorezovd@mail.ru](mailto:Nedorezovd@mail.ru)
- А. И. Постников** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительная техника» Института космических и информационных технологий; Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; [alpost@mail.ru](mailto:alpost@mail.ru)
- А. В. Мурыгин** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск; [avm514@mail.ru](mailto:avm514@mail.ru)
- А. В. Шнайдер** магистрант Института космических и информационных технологий; Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; [shnayder102@gmail.com](mailto:shnayder102@gmail.com)

Целью работы является разработка и описание нового метода испытаний электронной аппаратуры космических аппаратов. Обоснована актуальность разработки новых методов и средств испытаний бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов на основе намеренного внесения неисправностей с целью проверок алгоритмов живучести. Показано, что проведение таких испытаний позволяет повысить полноту контроля и надёжность бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов при одновременном сокращении затрат на испытания. Метод испытаний программного обеспечения космических аппаратов на основе внесения неисправностей применён для решения частной задачи проверок режимов ориентации и стабилизации. Предложенный метод позволяет разрабатывать полунатурные модели бортовой электронной аппаратуры повышенной адекватности и реконфигурируемости за счёт применения в качестве основы аппаратно-программных комплексов программируемые логические интегральные схемы. Метод реализован на аппаратно-программных средствах наземного отладочного комплекса бортовой электронной аппаратуры и отличается возможностью имитации широкого спектра бортовой электронной аппаратуры, низкой стоимостью и мобильностью. Все описанные в статье технические решения внедрены в производственный процесс при создании современных космических аппаратов связи, радионавигации и геодезии.

*Бортовая электронная аппаратура; космический аппарат; РХИ; модульные системы; испытания; контроль; автоматизация; адекватность моделей; системы ориентации и стабилизации*

---

**Цитирование:** Недорезов Д.А., Постников А.И., Мурыгин А.В., Шнайдер А.В. Метод испытаний программного обеспечения электронной аппаратуры космических аппаратов на основе внесения неисправностей в алгоритмы ориентации и стабилизации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 79-88. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-79-88

### Введение

В настоящее время возрос объём применения многоспутниковых низкоорбитальных группировок малых космических аппаратов (КА), обеспечивающих различные потребности народного хозяйства. В России подобной системой является «Сфера» [1], за рубежом известны такие системы, как «Starlink» [2], «OneWeb» [3], «Globalstar» [4] и другие. Подобные спутниковые системы могут включать сотни и даже тысячи иску-

ственных спутников Земли, что сказывается на стоимости их ввода в эксплуатацию и применения. Затраты на производство такого большого количества КА затрудняют коммерциализацию проектов и, в частности, вынуждают производителей применять более дешевую компонентную базу класса «Industrial» вместо «Military» и «Space» при разработке бортовой электроники. Такой метод снижения стоимости может оказать негативное влияние на безотказность, долговечность и сохраняемость КА, что ввиду важности задач, решаемых этими системами, неприемлемо. Сохранение надёжности КА при снижении затрат на их разработку и производство следует обеспечивать применением алгоритмов и средств обеспечения живучести. Например, помехоустойчивое кодирование, избыточность временных ресурсов на повторные попытки передачи информации, дистанционная перезапись бортового программного обеспечения (ПО) по радиоканалам из центров управления полётами и резервирование приборов и систем КА. Реализация приведённых методов обеспечения живучести требует их тщательных проверок на Земле, в частности для бортовой электронной аппаратуры (БЭА) КА, например, внесения неисправностей в передаваемые сообщения для проверки их парирования помехоустойчивым кодированием или внесение неисправностей для фиксации повторных попыток передачи информации. Проведение мероприятий по внедрению методов испытаний алгоритмов обеспечения живучести на основе намеренного внесения неисправностей не должно увеличивать их бюджеты. В современных КА методы обеспечения живучести применяются, в том числе, при ориентации КА на Солнце для бесперебойного обеспечения функционирования системы электропитания даже при отказе основных бортовых систем управления. Испытания с внесением неисправностей для таких режимов актуально проводить не только для многоспутниковых низкоорбитальных систем, но и для любых КА, в том числе с массой свыше 1000 килограмм.

Таким образом, актуальной задачей является разработка новых методов и средств наземной экспериментальной отработки (НЭО) БЭА КА, с имитацией нештатных ситуаций режимов ориентации и стабилизации, для повышения полноты контроля и надёжности КА при одновременном снижении временных и материальных издержек на испытания.

### **Проблемы, которые необходимо решить для достижения цели**

Для достижения необходимого эффекта от проведения испытаний необходимо максимально точно воспроизводить на Земле процессы бортового функционирования, то есть осуществлять моделирование БЭА КА. Степень приближенности моделей к штатным образцам БЭА, а равно и процесса взаимодействия моделей между собой, называется адекватностью моделей. Для повышения адекватности моделирования, необходимо воспроизводить на Земле процесс штатного функционирования БЭА КА в космическом пространстве в режиме реального времени, то есть обеспечивать адекватность по временным характеристикам. Основной проблемой, препятствующей проведению испытаний БЭА КА в режиме реального времени, является высокая степень временного детерминизма взаимодействия бортовых приборов и их составляющих между собой. БЭА КА зачастую функционирует на сверхвысоких частотах, она также сильно восприимчива к погрешностям выдачи команд управления и считывания ответных реакций «точно вовремя». Наблюдаются ситуации, когда из-за несвоевременного ответа от модели в процессе моделирования электронный элемент, выдавший управляющее воздействие, определяет такую ситуацию как нештатную и прекращает дальнейшее взаимодействие по электронным интерфейсам, что не позволяет достичь цели испытаний. Такие ситуации в некоторых случаях могут возникнуть даже при опоздании ответа на десятки наносекунд, что делает полунатурное моделирование крайне сложной задачей. Управление такой системой при помощи любой операционной системы

общего назначения невозможно, так как будут возникать непредсказуемые задержки большой длительности, например, из-за эффекта вытеснения задач друг другом в многозадачных операционных системах. Задачу обеспечения требуемого уровня адекватности моделей возможно решить путём применения операционных систем реального времени [5], но для некоторых, наиболее критичных к временному детерминизму задач, они не подойдут. На сегодняшний день средством, позволяющим обеспечить требуемый уровень адекватности полунатурных моделей для всего массива задач, являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Этот инструмент одновременно позволяет обеспечить режим жёсткого реального времени при моделировании и гибко конфигурировать логику своей работы, имитируя, таким образом, любую БЭА КА. На сегодняшний день производители по всему миру, включая Российскую Федерацию, предоставляют такую номенклатуру типов контрольно-испытательной аппаратуры (КИА), которая позволяет имитировать любую БЭА КА [6 – 8].

Адекватно имитировать штатные бортовые режимы функционирования БЭА КА – это лишь часть задач, которые необходимо решать, также необходимо имитировать неисправности БЭА КА для воспроизведения нештатных ситуаций, которые возможны и периодически происходят на борту. Например, для того, чтобы испытать бортовой алгоритм обеспечения живучести, реализованный путём внесения избыточности временных ресурсов на повторные попытки передачи информации, необходимо имитировать непрохождение команды управления из управляющей аппаратно-программной модели в принимающую и соответствующий ошибочный ответ или его отсутствие.

### **Аппаратно-программные средства достижения цели**

Для решения поставленных задач были разработаны методы и средства, позволяющие осуществлять испытания с требуемым уровнем адекватности моделей [9; 10]. Данная технология объединяет совокупность методов и средств и получила общее название наземный отладочный комплекс (НОК) БЭА.

НОК БЭА состоит из полунатурных моделей, которые имеют аппаратно-программное исполнение и реализованы по магистрально-модульному принципу. В основе этих полунатурных моделей лежат стандарты внутриприборной организации РХИ, сРСИ и другие [11 – 15]. Испытательные комплексы НОК содержат в своем составе модули цифрового и аналогового ввода-вывода, цифровые интерфейсные контроллеры, мультиметры, осциллографы, сверхвысокочастотные генераторы, устройства коммутации сигналов, и прочую КИА, позволяющую имитировать любую БЭА КА. Разработанные испытательные комплексы НОК обладают следующими преимуществами:

- возможность имитации нештатных ситуаций путём применения алгоритмов внесения неисправностей;
- реализация режима жёсткого реального времени по средствам ПЛИС;
- комплексность моделирования, то есть моделирование всей БЭА из состава КА;
- мобильность испытательных комплексов;
- реконфигурируемость модульной аппаратуры испытательных комплексов, включая внутреннюю реконфигурируемость ПЛИС.

Центральные управляющие устройства НОК установлены в крейт-шасси и представляют собой крейт-контроллеры, на которых установлены операционные системы общего назначения типа Microsoft Windows. Данная технология организации испытательных комплексов поддерживает Plug&Play, управление обычными манипуляторами мышью и клавиатурой и вывод данных на стандартный дисплей. Неисправности вносятся в модели при помощи специального устройства, которое реализовано в модульном исполнении и содержит в своем составе ПЛИС и каналы ввода-вывода, которые соединяют его с остальной КИА. Управление процессом испытаний обеспечивает пакет

прикладных программ. Исполнение моделей БЭА на ПЛИС позволяет отказаться от моделирования временных промежутков, так как современные ПЛИС функционируют на таких же частотах, как БЭА КА, которая зачастую имеет исключительно аппаратную реализацию [16 – 18]. Достаточно просто запрограммировать ПЛИС на работу на необходимой частоте и запустить функционирование такой аппаратно-программной модели высокой степени адекватности. ПЛИС обладают высокой гибкостью, на них можно реализовывать модели любой БЭА, которая необходима для испытаний путём простого перепрограммирования, что требует намного меньше материальных и временных средств, чем аппаратное макетирование, для которого потребуется приобретение натуральной электронной компонентной базы (ЭКБ) и трудоёмкого процесса её монтажа на печатные платы. Такой подход предоставляет возможность проводить качественные испытания при небольших затратах.

На рис. 1 приведена фотография полунатурного аппаратно-программного НОК БЭА КА, который был описан выше.



*Рис. 1. Наземный отладочный комплекс бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов*

### **Предлагаемый метод испытаний**

На описанных средствах НОК БЭА был реализован метод испытаний ПО режимов ориентации космических аппаратов на основе внесения неисправностей, который состоит в следующем. Полунатурно на ПЛИС имитируют БЭА, которая, в процессе штатной эксплуатации взаимодействует с испытываемым устройством. К такой БЭА могут относиться, например, интерфейсные модули сопряжения (ИМС), которые соединяют испытываемое устройство с различными системами КА и могут участвовать в процессе ориентации и стабилизации. Далее в проекты ПЛИС полунатурных моделей БЭА, реализованные на языках описания аппаратуры, намеренно вносят неисправности, имитирующие нештатные ситуации, а затем проводят испытания с целью оценки вероятности обнаружения или/и парирования испытываемым устройством внесённых в модели БЭА неисправностей. Например, в функции одного из ИМС входит сбор данных об угловых скоростях, измеренных прибором системы ориентации и стабилизации, и передача полученных данных в испытываемое устройство. Тогда неисправностью, имитирующей нештатную ситуацию, может быть, например, нарушение соединительного контакта на магистрали передачи данных при действии дестабилизирующих факторов космического пространства, таких как вибрации, удары, температурные воздействия и пр. Это может привести к искажению данных перед их получением испытываемым устройством, что и имитируется на полунатурных моделях, причём важно обеспечить функционирование моделей на таких же или более высоких частотах

и так же детерминировано (точно и предсказуемо), как это происходит на борту КА. Иначе, в большинстве случаев, испытания бортовых устройств невозможны. Поэтому для полунатурного моделирования в заявленном способе применяются ПЛИС, которые отвечают запрашиваемым для адекватных испытаний характеристикам. В ходе испытаний на языках описания аппаратуры создают проект исправной полунатурной модели БЭА, имитирующий функционирование ее каналов ввода-вывода. Далее записывают получившийся проект исправной полунатурной модели БЭА в ПЛИС устройства имитации неисправностей, содержащего интерфейсные каналы ввода-вывода и проводят испытания на проекте исправной полунатурной модели БЭА. На языках описания аппаратуры создают проект неисправной полунатурной модели БЭА, причём предусматривают возможность включения/отключения неисправностей без перекомпиляции проекта ПЛИС в процессе испытаний при помощи управляющего ПО высокого уровня. Это сильно сокращает количество перекомпиляций проектов ПЛИС, которые занимают много времени. Реализовано это таким образом, что в заявленном способе в проектах ПЛИС имитационных моделей предусматривают возможность включения/отключения каждой отдельной неисправности путём введения программируемой логической структуры «ЕСЛИ», которая управляется ПО высокого уровня путём формирования массива управляющих воздействий включения/отключения. Получившийся проект неисправной полунатурной модели записывают в ПЛИС устройства имитации неисправностей. При помощи устройства управления процессом испытаний формируют массив управляющих воздействий поочередно включающих неисправности, реализованные в проекте неисправной полунатурной модели и указанные в массиве. Проводят такие же испытания на проекте неисправной полунатурной модели, как и в предыдущем случае с проектом исправной полунатурной модели. При помощи устройства управления процессом испытаний сравнивают результаты испытаний от проекта исправной полунатурной модели и проекта неисправной полунатурной модели БЭА на каждой неисправности из заданного массива.

Если в процессе испытаний на проекте исправной полунатурной модели БЭА неисправностей не обнаруживают, а при испытаниях на проекте неисправной полунатурной модели БЭА обнаруживают весь массив внесенных неисправностей, то испытываемое устройство считают прошедшим испытания. Если в процессе испытаний на проекте исправной полунатурной модели БЭА обнаруживают неисправности, то определяют коэффициент первого этапа путём вычисления отношения единицы к количеству обнаруженных неисправностей. Если в процессе испытаний на проекте неисправной полунатурной модели БЭА обнаруживают не все неисправности, то определяют коэффициент второго этапа путём вычисления отношения количества внесённых в модель неисправностей к количеству обнаруженных. Путём выдачи серии команд от имитационных моделей БЭА вводят испытываемое устройство в режим ориентации и стабилизации. Испытываемое устройство инициирует итерацию ориентации и стабилизации КА по следующему алгоритму. Испытываемое устройство запрашивает текущее состояние направленности и угловые скорости движения КА от полунатурных моделей БЭА ориентации и стабилизации.

В рамках заявленного способа полунатурные модели ориентации и стабилизации и полунатурные модели всей остальной БЭА КА, хотя и являются полунатурными имитационными моделями одного типа, но намеренно выделены отдельно для упрощения описания алгоритмов испытаний.

Полунатурные модели ориентации и стабилизации принимают запрос от испытываемого устройства и анализируют его на предмет адреса устройства на информационной магистрали с целью определения адресата данной команды. В качестве информационной магистрали может быть использован, например интерфейс, описанный в

ГОСТ Р 52070-2003, или любой другой, подходящий для задач испытаний. По принятому запросу соответствующая полунатурная модель БЭА ориентации и стабилизации, которая определена как адресат данного запроса, на основе математической модели движения КА в пространстве, рассчитывает текущие состояние направленности и угловые скорости движения КА и выдаёт их в испытываемое устройство. Далее испытываемое устройство анализирует полученные данные от полунатурной модели БЭА ориентации и стабилизации и на основе результатов анализа формирует команду управления на включение/отключение необходимых для ориентации и стабилизации двигателей, что завершает итерацию ориентации и стабилизации КА. Математическая модель движения КА реализуется в устройстве управления процессом испытаний на языках высокого уровня или в полунатурных моделях БЭА ориентации и стабилизации на языках описания аппаратуры. Подобные итерации ориентации и стабилизации повторяют многократно до тех пор, пока КА не сориентируется на заданный ориентир. Ориентиром может быть, например Солнце или другие звёзды. В полунатурные модели ориентации и стабилизации вносятся неисправности как описано выше, например, имитируется не включение одного из устройств, которым управляет данный ИМС, что является непрохождением команды от одной из полунатурных моделей всей остальной БЭА КА, что активирует алгоритм живучести, заключающийся в повторных попытках выдачи данной команды, которые фиксируются в протокол испытаний и в дальнейшем анализируются [19 – 21].

Необходимо отметить, что в рамках заявленного способа испытаний устройств систем управления КА, имеющих функцию ориентации и стабилизации, модели на ПЛИС функционируют как «чёрный ящик», лишь функционально имитируя действия каналов ввода-вывода электронных устройств или их частей, при этом ставится задачей максимально адекватно воспроизвести входные и выходные сигналы по временным параметрам для обеспечения взаимодействия с натуральным испытываемым устройством, подключенным к данным каналам в процессе испытаний. Внутренняя реализация моделей на ПЛИС имеет лишь отдаленную схожесть с внутренней реализацией имитируемой БЭА.

Устройство управления процессом испытаний реализовано в крейт-шасси, например PXIe-1075, управляемом встроенным контроллером, к которому подключаются манипуляторы мышь и клавиатура. Данные о процессе испытаний выводятся на монитор. Управление встроенным контроллером обеспечивает операционная система и пакет прикладных программ. Также при помощи пакета прикладных программ задаётся массив неисправностей для проекта неисправной полунатурной модели БЭА. Данные, полученные в процессе испытаний, протоколируются и результаты сравниваются. Вычисляются коэффициенты покрытия неисправностей проведённых испытаний R1 и R2. Устройство имитации неисправностей в модульном исполнении, содержащее ПЛИС и каналы ввода-вывода для соединения с устройством управления, встраивают в крейт-шасси устройства управления. Например, таким устройством может быть PXI-7954 с установленным адаптером NI FlexRIO-6585.

### **Заключение**

Разработанный метод испытаний ПО режимов ориентации космических аппаратов на основе внесения неисправностей позволяет обеспечить:

- испытания в режиме внесения неисправностей для имитации нештатных ситуаций;
- испытания в режиме жёсткого реального времени за счёт применения ПЛИС для повышения адекватностей моделей;
- имитацию широкого спектра БЭА КА;

- высокую степень реконфигурируемости за счёт применения ПЛИС и модульной аппаратуры;
- низкую стоимость разработки полунатурных моделей;
- высокую мобильность испытательных комплексов, которые имеют массу не более 20 килограмм.

Таким образом, предложенный метод испытаний БЭА КА основан на применении ПЛИС в качестве базы полунатурных моделей и позволяет проводить испытания алгоритмов и ПО ориентации и стабилизации КА с имитацией нештатных ситуаций в режиме жёсткого реального времени, что позволяет повысить полноту контроля и надёжность КА при одновременном снижении временных и материальных издержек на испытания.

### **Библиографический список**

1. Сайт журнала Вестник ГЛОНАСС. <http://vestnik-glonass.ru/news/corp/roskosmos-nachata-rabota-po-proektu-sfera>
2. Сайт компании Starlink. <https://www.starlink.com>
3. Сайт компании OneWeb. <https://oneweb.net>
4. Сайт компании Globalstar. <https://www.globalstar.com/en-us>
5. Сайт компании TechSat  
[http://www.techsat.com/fileadmin/media/pdf/ADS2\\_ProductOverview/TechSAT-PD-ADS2-EN.pdf](http://www.techsat.com/fileadmin/media/pdf/ADS2_ProductOverview/TechSAT-PD-ADS2-EN.pdf)
6. Parker K.P. A new probing technique for high-speed/high-density printed circuit boards // Proceedings of the International Test Conference (October, 26-28, 2004, Washington, DC, USA). DOI: 10.1109/TEST.2004.1386972
7. Norrgard D., Parker K.P. Augmenting boundary-scan tests for enhanced defect coverage // Proceedings of the IEEE International Test Conference (December, 08, 2008, Santa Clara, CA, USA). DOI: 10.1109/TEST.2008.4700580
8. Dubberke D.F., Grealish J.J., Van Dick B. Solving in-circuit defect coverage holes with a novel boundary scan application // Proceedings of the IEEE International Test Conference (December, 08, 2008, Santa Clara, CA, USA). DOI: 10.1109/TEST.2008.4700579
9. Недорезов Д.А., Пичкалев А.В., Красненко С.С., Непомнящий О.В. Применение ПЛИС для моделирования логики функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 1 (53). С. 133-136.
10. Красненко С.С., Недорезов Д.А., Кашкин В.Б., Пичкалев А.В. Магистрально-модульная система для отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнёва. 2013. № 2 (48). С. 133-136.
11. Kulyasov N., Isaeva O., Isaev S. Method of creation and verification of the spacecraft onboard equipment operation model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 537, Iss. 2. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022042
12. Li T., Guo Y., Li S.-K. Design and implementation of a parallel Verilog simulator: PVSIM // Proceedings of the 17th International Conference on VLSI Design (January, 09, 2004, Mumbai, India). DOI: 10.1109/ICVD.2004.1260944
13. Austin T., Larson E., Ernst D. SimpleScalar: An infrastructure for computer system modeling // Computer. 2002. V. 35, Iss. 2. P. 59-67. DOI: 10.1109/2.982917

14. Li Z., Hu X., Zhang G. Design and realization of HA hot-swap application for CPCI/PXI system // Proceedings of the 2015 10th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2015 (June, 15-17, 2015, Auckland, New Zealand). P. 1613-1617. DOI: 10.1109/ICIEA.2015.7334220

15. Li D., Hu X. Hot-swap and redundancy technology for CPCI measurement and control systems // IEICE Electronics Express. 2016. V. 13, Iss. 20. DOI: 10.1587/elex.13.20160794

16. Penry D.A., Fay D., Hodgdon D., Wells R., Schelle G., August D., Connors D. Exploiting parallelism and structure to accelerate the simulation of chip multi-processors // Proceedings of the 12th International Symposium on High-Performance Computer Architecture (February, 1-15, 2006, Austin, TX, USA). P. 27-38. DOI: 10.1109/HPCA.2006.1598110

17. Schnarr E., Larus J.R. Fast out-of-order processor simulation using memorization // Proceedings of the Eight International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (October, 3-7, 1998, San Jose, California, USA.). P. 283-294. DOI: 10.1145/291069.291063

18. Desikan R., Burger D., Keckler S.W. Measuring experimental error in microprocessor simulation // Proceedings of the 28th Annual International Symposium on Computer Architecture ISCA (June, 30-4, 2001, Gothenburg, Sweden). P. 266-277. DOI: 10.1109/ISCA.2001.937455

19. Недорезов Д.А., Легалов А.И., Непомнящий О.В., Красненко С.С., Анкудинов А.В. Методология мутационного тестирования для наземных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов // Системы и средства информатики. 2014. Т. 24, № 1. С. 73-79. DOI: 10.14357/08696527140104

20. Недорезов Д.А. Способ испытаний электронной аппаратуры на основе аппаратно-программного внесения неисправностей с маршрутизацией: патент РФ № 2725783; опублик. 06.07.2020; бюл. № 19.

21. Недорезов Д.А. Способ испытаний вычислительных устройств систем управления космических аппаратов: патент РФ № 2764837; опублик. 21.01.2022; бюл. №3.

## **METHOD OF TESTING THE SOFTWARE OF SPACECRAFT ELECTRONIC EQUIPMENT BASED ON FAULT INJECTION IN THE ALGORITHMS OF ORIENTATION AND STABILIZATION**

© 2024

- D. A. Nedorezov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computing Technology, Institute of Space and Information Technologies; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; [Nedorezovd@mail.ru](mailto:Nedorezovd@mail.ru)
- A. I. Postnikov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computing Technology, Institute of Space and Information Technologies; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; [alpost@mail.ru](mailto:alpost@mail.ru)
- A. V. Murigin** Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Information Management Systems; Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russian Federation; [avm514@mail.ru](mailto:avm514@mail.ru)
- A. V. Shnaider** Master Student of the Institute of Space and Information Technologies; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; [shnavder102@gmail.com](mailto:shnavder102@gmail.com)

The purpose of the work is to develop and describe a new method of testing spacecraft electronic equipment. The article substantiates the relevance of developing new methods and means of testing on-board electronic equipment of spacecraft based on the intentional introduction of faults for the purpose of testing survivability algorithms. It was shown that carrying out such tests makes it possible to increase the completeness of control and reliability of on-board electronic equipment of spacecraft while simultaneously reducing testing costs. A new method for testing spacecraft software based on fault injection is proposed, which is used to solve the specific task of checking orientation and stabilization modes. The proposed method makes it possible to develop semi-natural models of on-board electronic equipment of increased adequacy and reconfigurability due to the use of programmable logic integrated circuits as the basis of hardware and software complexes. The proposed method is implemented on the hardware and software of a ground-based debugging complex for on-board electronic equipment and is distinguished by the ability to simulate a wide range of on-board electronic equipment, low cost and mobility. All technical solutions described in the article were introduced into the production process when creating modern spacecraft for communications, radio navigation and geodesy.

*Onboard electronic equipment; spacecraft; PXI; modular systems; testing; control; automation; model adequacy; orientation and stabilization systems*

*Citation:* Nedorezov D.A., Postnikov A.I., Murigin A.V., Shnaider A.V. Method of testing the software of spacecraft electronic equipment based on fault injection in the algorithms of orientation and stabilization. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 4. P. 79-88. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-79-88

## References

1. *Sayt zhurnala Vestnik GLONASS* [Website of the journal Vestnik GLONASS]. Available at: <http://vestnik-ghonass.ru/news/corp/roskosmos-nachata-rabota-po-proektu-sfera>
2. *Sayt kompanii Starlink* [Starlink company website]. Available at: <https://www.starlink.com>
3. *Sayt kompanii OneWeb* [OneWeb company website]. Available at: <https://oneweb.net>
4. *Sayt kompanii Globalstar* [Globalstar company website]. Available at: <https://www.globalstar.com/en-us>
5. *Sayt kompanii TechSat* [TechSat company website]. Available at: [http://www.techsat.com/fileadmin/media/pdf/ADS2\\_ProductOverview/TechSAT-PD-ADS2-EN.pdf](http://www.techsat.com/fileadmin/media/pdf/ADS2_ProductOverview/TechSAT-PD-ADS2-EN.pdf)
6. Parker K.P. A new probing technique for high-speed/high-density printed circuit boards. *Proceedings of the International Test Conference (October, 26-28, 2004, Washington, DC, USA)*. DOI: 10.1109/TEST.2004.1386972
7. Norrgard D., Parker K.P. Augmenting boundary-scan tests for enhanced defect coverage. *Proceedings of the IEEE International Test Conference (December, 08, 2008, Santa Clara, CA, USA)*. DOI: 10.1109/TEST.2008.4700580
8. Dubberke D.F., Grealish J.J., Van Dick B. Solving in-circuit defect coverage holes with a novel boundary scan application // *Proceedings of the IEEE International Test Conference (December, 08, 2008, Santa Clara, CA, USA)*. DOI: 10.1109/TEST.2008.4700579
9. Nedorezov D.A., Pichkalev A.V., Krasnenko S.S., Nepomnuashy O.V. Application fpga for modelling of logic of functioning of spacecraft onboard radio-electronic equipment. *Vestnik of SibGAU*. 2014. No. 1 (53). P. 133-136. (In Russ.)
10. Krasnenko S.S., Nedorezov D.A., Kashkin V.B., Pichkalev A.V. Bus-modular system for test of onboard radioelectronic equipment. *Vestnik of SibGAU*. 2013. No. 2 (48). P. 133-136. (In Russ.)
11. Kulyasov N., Isaeva O., Isaev S. Method of creation and verification of the spacecraft onboard equipment operation model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 537, Iss. 2. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022042

12. Li T., Guo Y., Li S.-K. Design and implementation of a parallel Verilog simulator: PVSIm. *Proceedings of the 17th International Conference on VLSI Design (January, 09, 2004, Mumbai, India)*. DOI: 10.1109/ICVD.2004.1260944

13. Austin T., Larson E., Ernst D. SimpleScalar: An infrastructure for computer system modeling. *Computer*. 2002. V. 35, Iss. 2. P. 59-67. DOI: 10.1109/2.982917

14. Li Z., Hu X., Zhang G. Design and realization of HA hot-swap application for CPCI/PXI system. *Proceedings of the 2015 10th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2015 (June, 15-17, 2015, Auckland, New Zealand)*. P. 1613-1617. DOI: 10.1109/ICIEA.2015.7334220

15. Li D., Hu X. Hot-swap and redundancy technology for CPCI measurement and control systems. *IEICE Electronics Express*. 2016. V. 13, Iss. 20. DOI: 10.1587/elex.13.20160794

16. Penry D.A., Fay D., Hodgdon D., Wells R., Schelle G., August D., Connors D. Exploiting parallelism and structure to accelerate the simulation of chip multi-processors. *Proceedings of the 12th International Symposium on High-Performance Computer Architecture (February, 1-15, 2006, Austin, TX, USA)*. P. 27-38. DOI: 10.1109/HPCA.2006.1598110

17. Schnarr E., Larus J.R. Fast out-of-order processor simulation using memorization. *Proceedings of the Eight International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (October, 3-7, 1998, San Jose, California, USA)*. P. 283-294. DOI: 10.1145/291069.291063

18. Desikan R., Burger D., Keckler S.W. Measuring experimental error in microprocessor simulation. *Proceedings of the 28th Annual International Symposium on Computer Architecture ISCA (June, 30-4, 2001, Gothenburg, Sweden)*. P. 266-277. DOI: 10.1109/ISCA.2001.937455

19. Nedorezov D.A., Legalov A.I., Nepomnjashhij O.V., Krasnenko S.S., Ankudinov A.V. Mutation test methodology for onboard spacecrafts radioelectronic equipment ground test. *Systems and Means of Informatics*. 2014. V. 24, no. 1. P. 73-79. (In Russ.). DOI: 10.14357/08696527140104

20. Nedorezov D.A. *Sposob ispytaniy elektronnoy apparatury na osnove apparatno-programmnogo vneseniya neispravnostey s marshrutizatsiey* [Method of testing electronic hardware based on hardware-software faults with routing]. Patent RF, no. 2725783, 2020. (Publ. 06.07.2020, bull. no. 19)

21. Nedorezov D.A. *Sposob ispytaniy vychislitel'nykh ustroystv sistem upravleniya kosmicheskikh apparatov* [Method for testing computing devices of spacecraft control systems]. Patent RF, no. 2764837, 2022. (Publ. 21.01.2022, bull. no. 3)