

# ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ИС ДЛЯ БОРТОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

**МАЙЯ АРТЮХОВА**, магистр техники и технологий, аспирант, МИЭМ НИУ ВШЭ  
**СЕРГЕЙ ПОЛЕССКИЙ**, к.т.н., доцент, МИЭМ НИУ ВШЭ  
**ВАЛЕРИЙ ЖАДНОВ**, к.т.н., доц., лауреат Премии Правительства РФ, доцент, МИЭМ НИУ ВШЭ

*Одним из показателей развития промышленности, экономики и науки в стране является эффективность ее космической программы. От успешного функционирования различных космических систем зависит развитие отрасли телекоммуникаций и телевидения, разведка полезных ископаемых, мониторинг окружающей среды, обеспечение обороноспособности страны. И если когда-то было достаточно, чтобы космический аппарат (КА) функционировал сначала 1 год, потом 5 лет, то теперь стоит задача обеспечения срока активного существования КА в течение 20–25 лет. Современные тенденции в конструировании КА – создание унифицированных платформ, малых КА и т.д. – делают еще более актуальной задачу обеспечения требуемого срока активного существования.*

При эксплуатации на бортовую космическую аппаратуру (БКА) влияет множество факторов. Особое значение для применяемых в ней полупроводниковых изделий микроэлектроники имеет воздействие полей ионизирующих излучений космического пространства. Для элементной базы БКА характерна зависимость электрических параметров от воздействия ионизирующих излучений. Например, у биполярных логических интегральных микросхем (ИС) наблюдается уход (увеличение) напряжения логического «0» (см. рис. 1).

Применение ИС в качестве электронной компонентной базы БКА сделало актуальной задачу прогнозирования устойчивости аппаратуры к воздействиям ионизирующего излучения в космосе. Когда БКА теряет работоспособность под воздействием ионизирующего излучения, то говорят о двух основных причинах: деградации

параметров ИС вследствие накопления дозы радиации и одиночных событиях. Приблизительно 50% всех отказов БКА происходит из-за воздействия ионизирующего излучения.

Военная и аэрокосмическая промышленность используют передовые электронные средства для обеспечения таких требований к космическим аппаратам как объем, вес, мощность и стоимость. Отказоустойчивость и высокая надежность всегда были существенными признаками этих систем, обуславливающими возможность их длительной эксплуатации в космическом пространстве.

В настоящее время наметилась тенденция применения в БКА коммерческих ИС иностранного производства. Такие ИС имеют ряд преимуществ по сравнению со специальными радиационностойкими ИС, т.к. коммерческие ИС широко представлены на

российском рынке электронной компонентной базы (ЭКБ), имеют высокую производительность и т.д., а стоят значительно дешевле (разница в цене составляет в среднем 1–2 порядка).

Между ИС иностранного производства уровня качества «space» и так называемым «ширпотребом» есть еще широкий выбор микросхем, применение которых в БКА допустимо при введении дополнительных мер защиты: экранирования (в т.ч. локального), избыточного кодирования информации, применения схем защиты, резервирования и т.д. Так, избыточное кодирование и схемы защиты хорошо предохраняют от одиночных событий, вызывающих различные нарушения правильного функционирования ИС от смены логического состояния ячеек памяти (обратимый отказ) до резкого возрастания тока потребления (внезапный отказ). Экранирование позволяет резко ослабить величину дозовой нагрузки как внутри корпуса БКА, так и на отдельном печатном узле или ИС (локальное экранирование).

Однако прямая экономия средств при использовании коммерческих ИС иностранного производства теряется из-за увеличения затрат на их сертификацию, т.к. данные по стойкости к ионизирующему излучению космического пространства практически отсутствуют. Так, в техническом описании на продукцию приводятся, как

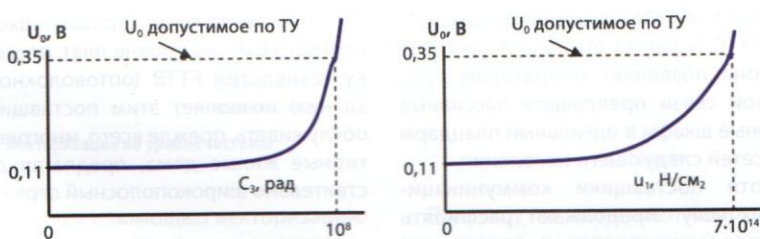


Рис. 1. Зависимость напряжения логического «0» биполярных логических микросхем от: а) гамма-излучения; б) нейтронного излучения

правило, лишь показатели стойкости по предельной накопленной дозе, а показатели энергии протонов, вызывающих одиночные сбои, сечение насыщения одиночных сбоев и внезапных отказов и некоторые другие характеристики, не приводятся.

По топологической норме можно приблизительно оценить стойкость ИС, но подобная оценка является грубо-приближенной. Определенные выводы об устойчивости ИС к одиночным событиям можно сделать, имея информацию о технологии изготовления, но это не те сведения, о которых фирмы-производители любят распространяться. Да и для того, чтобы получить такие данные, необходимо отправлять официальный запрос, и время ожидания ответа может составить несколько месяцев, что при проектировании БКА приводит к увеличению сроков разработки. Кроме того, некоторые фирмы просто не могут предоставить такую информацию, т.к. используют материалы, которые сами не производят.

Проблема отсутствия данных на импортные ИС решается путем проведения сертификационных испытаний. Обычно проводятся испытания на накопленную дозу и тиристорный эффект, которые являются обязательным (и очень дорогим) этапом создания БКА. При этом результаты испытаний ИС далеко не всегда отвечают заданным требованиям. Однако и в этом случае полученные показатели стойкости ИС к накопленной дозе вовсе не обязательно требуют исключения этих элементов из БКА.

В ряде случаев оценка коэффициента запаса при учете расположения ИС в конкретной конструкции позволяет обосновать возможность ее применения. Одним из способов такого обоснования является использование методики, позволяющей рассчитать прогнозируемые величины и положение локальных экранов, оценить необходимые и достаточные величины защиты со стороны элементов конструкции, повысить точность оценки дозовой нагрузки на ИС и, главное, оптимизировать компоновку с учетом воздействия ионизирующего излучения на ранних стадиях проектирования.

Применяемый в настоящее время метод оценки стойкости БКА, основанный на расчете частоты сбоев БКА за счет действия заряженных частиц космического пространства, проводится по методике РД 134-0139. В этом стандарте приведены также типовые значения параметров чувствительности ИС к одиночным эффектам при воздействии заряженных частиц. Однако

использование «типовых» параметров при оценке сбое- и отказоустойчивости дает большой разброс, а результаты расчетов далеки от действительности, т.к. значения параметров ИС не обновлялись с 2005 г. и с тех пор сильно устарели.

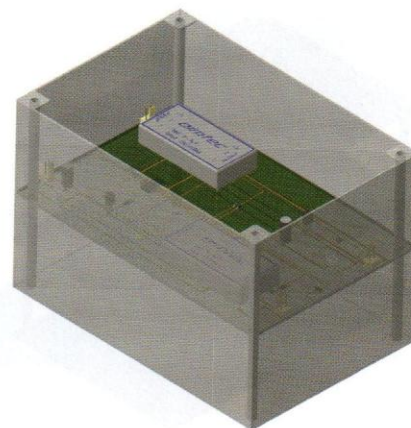
Оценка дозовых эффектов проводится в соответствии с ОСТ 134-1034. Стандарт развивает и дополняет основные положения и требования ГОСТ РВ 20.57.308 в части методов испытаний и оценки стойкости аппаратуры, приборов и оборудования КА к воздействию ионизирующего излучения по дозовым (необратимым параметрическим) эффектам и используется совместно с этим стандартом.

Расчет уровня стойкости БКА по ОСТ 134-1034 проводится поэлементным методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ИС с уровнем радиационного воздействия на нее (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенной расчетным путем. Уровень радиационных воздействий на БКА зависит от мест ее размещения в КА, классификация которых приведена в ГОСТ РВ 20.39.305.

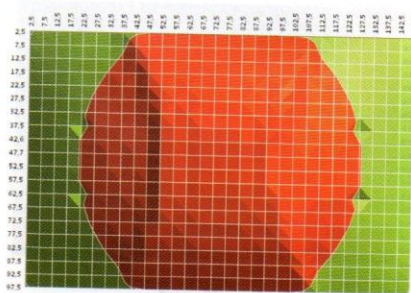
Результатом оценки является коэффициент запаса по радиационной стойкости ( $K_3$ ). В соответствии с ОСТ 134-1034 изделие имеет высокую предельную накопленную дозу, если  $K_3 \geq 3$ . Если же  $1 < K_3 < 3$ , то необходимо провести испытания в составе аппаратуры, причем сначала желательно испытать до заданного в ТЗ уровня, а потом — до отказа.

Исходными данными для расчетной оценки (прогнозирования) радиационной стойкости БКА являются техническое задание, информация о радиационной обстановке на орбите функционирования КА, технические условия на электрорадиоизделия (ЭРИ), принципиальная электрическая схема и т.д. Эти данные берутся за основу при анализе ЭКБ по предельной накопленной дозе, расчетах частоты возникновения одиночных сбоев и вероятности возникновения внезапного отказа. Результаты расчетной оценки служат основой для задания требований к конструктивному исполнению БКА, требований по стойкости БКА к внешним воздействующим факторам и требований к ЭКБ.

Как правило, степень защиты блоков аппаратуры по разным координатам неоднородна, поэтому для расчета уровней ионизирующего излучения с учетом защитных свойств конструкции КА применяется лучевой метод. Для сферической защиты этот метод носит название метода секторирования. Сущность метода состоит в том, что конструкцию КА (или блока аппа-



а)



б)

Рис. 2а. Печатный узел с дополнительной защитой в виде стенок блока; б — поле распределения накопленной дозы на печатном узле

ратуры) разделяют на ряд секторов с вершинами в точке определения дозы. Секторы выбираются таким образом, чтобы в пределах сектора защита была одинаковой.

Рассмотрим, как выглядит поле распределения уровней накопленной дозы на печатном узле в случае неоднородности защиты. Предположим, что печатный узел помещен внутрь блока, который в свою очередь установлен внутри КА. Примем, что модель защиты в виде сферы (величина воздействия ионизирующего излучения на КА одинакова со всех сторон). В этом случае величина накопленной дозы будет одинакова по всей поверхности печатного узла. Приняв эти условия, будем менять величины внешней массовой защиты и посмотрим, как будет меняться поле распределения накопленной дозы на печатном узле.

В первом случае поместим печатный узел в корпус со стенками из алюминия толщиной 4 мм (см. рис. 2 а), обеспечивающими дополнительно защиту  $\approx 1$  г/см<sup>2</sup>. Поле распределения накопленной дозы на печатном узле для этого случая показано на рисунке 2 б. Хорошо видно, что внесение дополнительной защиты в виде стенок блока создает пригодные для установ-

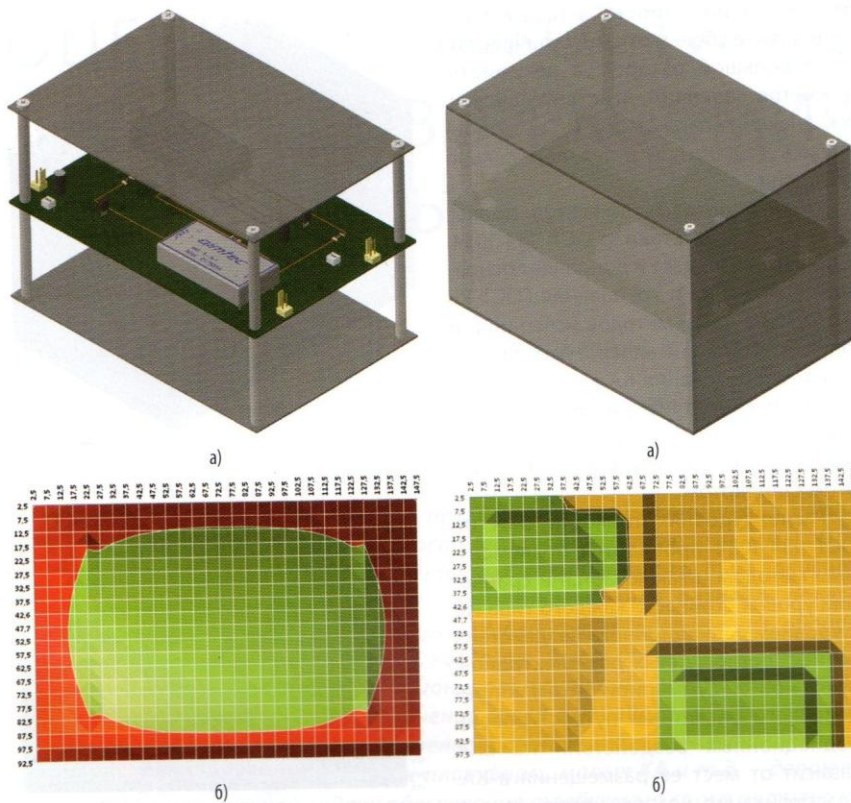


Рис. 3а. Печатный узел с дополнительной защитой в виде крышек блока; б — поле распределения накопленной дозы на печатном узле

Рис. 4а. Печатный узел с дополнительной защитой в виде стенок и крышек блока; б — поле распределения накопленной дозы на печатном узле с учетом защиты от DC/DC-преобразователей

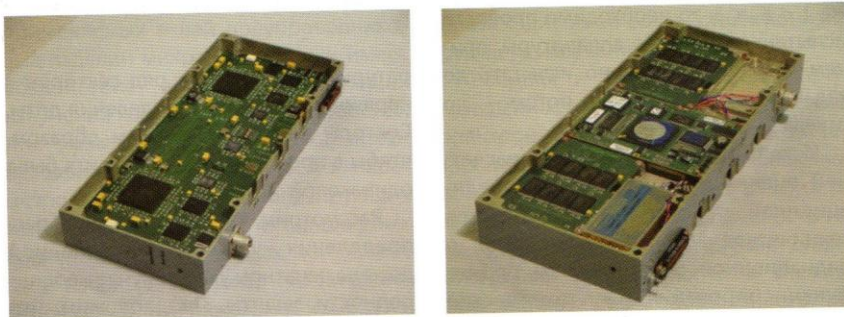


Рис. 5. Пример конструкции электронного модуля с установленными в нем двумя печатными узлами

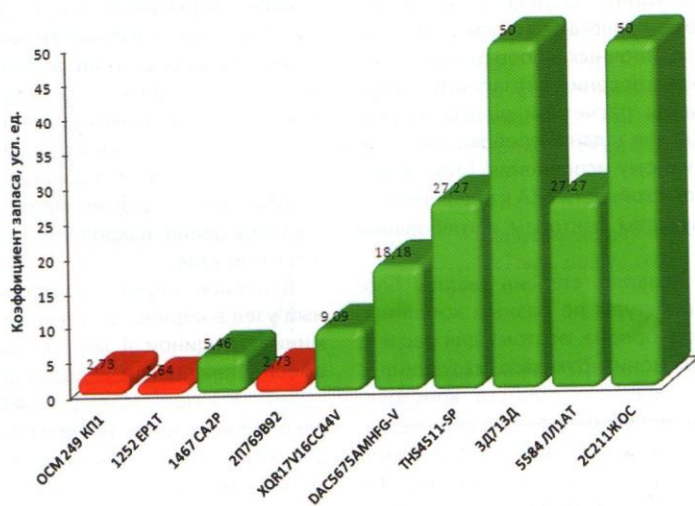


Рис. 6. Распределение значений  $K_2$  при оценке по «наихудшему случаю»

ки «слабых» ИС в зоны, расположенные по краям печатного узла.

Рассмотрим другой случай, когда печатный узел помещен в корпус с крышками из алюминия (см. рис. 3 а). Такой вариант дополнительного экранирования гораздо более распространен, чем первый, хотя бы в силу того, что в этом случае экран располагается параллельно печатному узлу, что априори обеспечивает лучший эффект экранирования, чем перпендикулярное расположение экрана. В подтверждение этому на рисунке 3 б приведено поле распределения накопленной дозы для этого случая. Как видно из рисунка, зона, пригодная для установки «слабых» ИС (расположенная в центре печатного узла), по площади больше, чем в первом случае.

Таким образом, можно сделать вывод, что в случае, когда печатный узел имеет низкие показатели по стойкости к накопленной дозе, самый простой способ решения проблемы — увеличить толщину крышек его корпуса.

Теперь посмотрим, как повлияют на поле распределения накопленной дозы установленные на печатном узле относительно большие по габаритам простые электронные компоненты, помещенные в металлические корпуса (преобразователи, источники питания и т.д.). Стоит отметить, что такие компоненты, как правило, сами весьма нечувствительны к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетических протонов космического пространства, т.е. другими словами практически не подвержены одиночным эффектам.

Для примера рассмотрим печатный узел с размещенными на нем DC/DC-преобразователями. Поскольку они имеют металлические корпуса, в данном случае их можно рассматривать как локальные экраны с величиной массовой защиты  $\approx 0,54 \text{ г/см}^2$ .

Положим, что печатный узел установлен в корпусе с одинаковой величиной массовой защиты со всех сторон (см. рис. 4а). В этом случае поле распределения накопленной дозы на нем при грубой оценке можно считать равномерным. На рисунке 4б хорошо видна создаваемая DC/DC-преобразователями зона, пригодная для установки «слабых» ИС.

Если в БКА применяются печатные узлы, на которых элементы устанавливаются только с одной стороны, но при этом в качестве базовой конструктивной единицы используются платы-рамки с установленными на них сразу двумя печатными узлами (см. рис. 5), то и в этом случае использующиеся «простые» электронные компоненты будут

создавать зоны, пригодные для установки «слабых» ИС.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что при моделировании поля распределения накопленной дозы на печатном узле следует учитывать не только элементы конструкции, но и «простые» ЭК, расположенные на них.

Покажем эффективность учета неоднородности поля распределения накопленной дозы на примере оценки  $K_3$ . Предположим, что на печатном узле установлено 10 ИС. Проведем расчет значений  $K_3$  для наихудшего случая по методике ОСТ 134-1034 (уровень дозовой нагрузки на всех ИС одинаковый). В этом случае рассчитанное значение накопленной дозы составило 5,0 Крад. На рисунке 6 приведены значения  $K_3$  ИС, соответствующие этой дозе. Как следует из рисунка 6, три ИС (ОСМ249КП1, 1252EP1Т, 2П769В92) имеют  $K_3 < 3$ .

Теперь допустим, что эти три ИС расположены в зонах, выделенных зеленым цветом на рисунке 4б. Величина накопленной дозы в этих зонах согласно расчетам равна 4,5 Крад. На рисунке 7 приведены результаты расчета  $K_3$  для этого случая.

Несмотря на то, что стойкость печатного узла повысилась, осталась одна микросхема (1252EP1Т), у которой  $K_3$  все

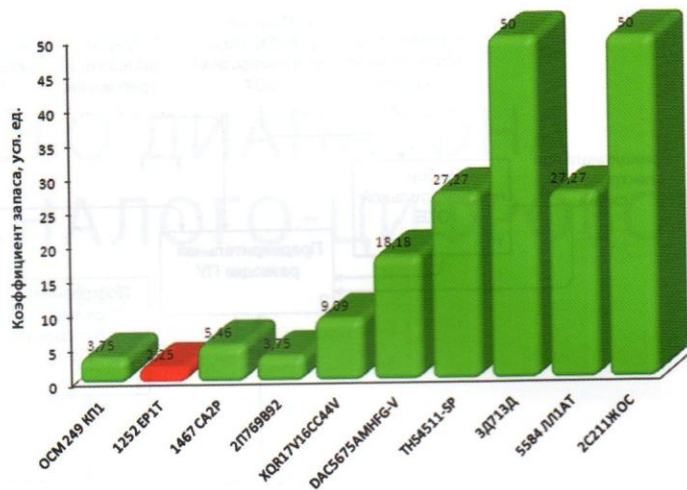


Рис. 7. Распределение значений  $K_3$  с учетом влияния защиты от DC/DC-преобразователей

равно меньше 3. В такой ситуации у разработчика есть несколько возможных путей:

- заменить микросхему на ее полный функциональный аналог, но более радиационнотойкий. Этот путь является наиболее предпочтительным, но на практике трудно осуществить;
- применить локальную защиту микросхемы, например, защитить корпус ИС фольгой из тантала, вольфрама и т.д.;

- увеличить толщину стенок и/или крышек блока. Реализуемость этого варианта во многом зависит от стадии завершенности БКА и жесткости ограничений на массогабаритные характеристики;
- оставить все, как есть, руководствуясь положением ГОСТ РВ 20.57.308 о том, что если экспериментально подтвержденный  $K_3$  лежит в диапазоне 1–3, то БКА допускается к применению. Однако здесь есть определенный риск, т.к. в этом случае

## ZigBit модули на 868МГц и 2,4ГГц стандарта IEEE802.15.4/ZigBee

для встраиваемых приложений

### Проверенные временем MCU от Atmel с RF интерфейсом

**Беспроводные технологии мониторинга и управления**

**Приложения**

- системы автоматизированного сбора данных со счетчиков воды, газа, эл. энергии;
- охранные системы;
- системы пожарной безопасности;
- управление и мониторинг оборудования жилых и промышленных зданий;
- контроль технического состояния приборов и устройств

- отличные RF параметры;
- длительная работа от батарей;
- компактные размеры (18.8 x 13.5 x 2.0 мм)

**ATZB-24-900-868МГц**  
**ATZB-24-B0/A2-2,4ГГц**  
**ATZB-A24-UFL/U0-2,4ГГц с усилителем**

- Наличие ПО реализующее функции ZigBee стека;
- Управление AT-командами;
- Встроенный начальный загрузчик;
- Широкий выбор интерфейсов (аналоговые/цифровые);
- Значительно сокращает время разработки

www.argussoft.ru

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР**

• Москва    • Санкт-Петербург    • Новосибирск    • Екатеринбург    • Казань

Тел.: (495) 660-2855    Тел.: (812) 412-0107    Тел.: (383) 227-1155    Тел.: (343) 378-3242    Тел.: (843) 293-4100  
 Факс: (495) 660-2855    Факс: (812) 412-1849    Факс: (383) 222-4031    Факс: (343) 378-3241    Факс: (843) 293-4100  
 E-mail: cmp@argussoft.ru    E-mail: spb@argussoft.ru    E-mail: nsk@argussoft.ru    E-mail: ural@argussoft.ru    E-mail: kazan@argussoft.ru



Рис. 8. Функциональная модель метода теневой защиты (БРЗА — бортовая радиоэлектронная аппаратура; ПУ — печатный узел)

все будет зависеть от результатов испытаний БКА.

Таким образом, при учете неоднородности поля распределения накопленной дозы разработчики БКА имеют возможность более точно оценить значения  $K_3$  и своевременно принять меры по их повышению. Поскольку неоднородности поля распределения накопленной дозы обусловлены «тенью» от элементов конструкции и простых электронных компонентов, то рассмотренный выше метод получил название метода теневой защиты. Функциональная модель метода представлена на рисунке 8.

Блок 1 во многом является определяющим в прогнозировании радиационной стойкости разрабатываемой БКА. Предварительный перечень ЭКБ формируется на основе принципиальной электрической схемы, ограничений, налагаемых требованиями технического задания по стойкости аппаратуры к воздействию ионизирующего излучения, характеристиками радиационной обстановки на орбите функционирования КА, требованиями стойкости к внешним воздействующим факторам и т.д.

В блоке 2 осуществляется предварительное размещение электронных компонентов на печатном узле, исходя из массогабаритных ограничений и конструктивного исполнения. В блоке 3 формируются данные, необходимые для построения сетки дискретизации печатного узла (выбираются шаг дискретизации и координаты начальных узлов). В блоке 4 проводится расчет телесных углов и накопленной дозы по узлам сетки дискретизации печатного узла лучевым методом, по результатам кото-

рого строится поле распределения накопленной дозы.

Сопоставив размещение «слабых» ИС, «простых» электронных компонентов и конструктивных элементов (тепловых шин, ребер жесткости и т.д.) на печатном узле с полем распределения накопленной дозы, можно, при необходимости, оптимизировать размещение компонентов на печатном узле или компоновку конструкции БКА по критерию стойкости к ионизирующему излучению.

В заключение следует отметить, что практическое применение метода теневой защиты при проектировании модулей БКА позволило в ряде случаев подтвердить возможность использования в них импортных ИС коммерческого уровня качества. Кроме того, в МИЭМ НИУ ВШЭ возможности применения метода теневой защиты рассматриваются при изучении дисциплины «Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры» направления 211000.68 «Конструирование и технология электронных средств» подготовки магистров, а также в программе краткосрочного повышения квалификации инженерно-технических работников — «Обеспечение радиационной стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов при проектировании».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианов Л.С., Герасимов С.Н., Каменский А.Г. Проблемы обеспечения радиационной стойкости и надежности электронной компонентной базы для бортовой аппаратуры космических аппаратов//Вопросы атомной науки и техники, вып. 3, 2011.

2. Артюхова М.А., Жаднов В.В., Полеский С.Н. Проблемы обеспечения стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на этапах проектирования//Компоненты и технологии, № 9, 2010.

3. Анашин В.С. Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования РЭА спутников связи//Электросвязь, № 4, 2009.

4. РД 134-0139-2005. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам.

5. ОСТ 134-1034-2003. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.

6. ГОСТ РВ 20.57.308-98. КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требований стойкости к воздействию ионизирующих излучений, электромагнитного импульса и светового излучения ядерного взрыва, ионизирующих излучений ядерных установок и космического пространства.

7. ГОСТ РВ 20.39.305-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к воздействию поражающих факторов ядерного взрыва, ионизирующих излучений ядерных установок и космического пространства.

8. Жданкин В. Радиационностойкие низковольтные DC/DC-преобразователи для распределенных систем электропитания ракетно-космической техники//Компоненты и технологии, № 7, 2011.

9. Жаднов В.В., Юрков Н.К. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры: учебное пособие. — Пенза: изд-во ПГУ, 2012.