



Виктор Жданкин

Устойчивость гибридных DC/DC-преобразователей к воздействию ионизирующих излучений космического пространства

Важнейшую роль в обеспечении длительной и безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры в космических условиях играет её устойчивость к воздействию комплексного ионизирующего излучения. Применение на борту космического аппарата электрорадиоизделий, не специфицированных как радиационно-стойкие, позволяет существенно снизить стоимость проекта, но требует проведения оценочных испытаний для подтверждения их устойчивости к воздействию ионизирующих излучений. В статье представлены методики и результаты таких испытаний, выполненных для гибридных DC/DC-преобразователей фирмы Interpoint (США). Материалы статьи содержат ответ на сохранивший свою актуальность вопрос, каким образом можно получить гарантии устойчивости компонентов к воздействию радиации, поставленный на семинаре «Проблемы обеспечения изделий авиационной и ракетно-космической отрасли высококачественной элементной базой», который был организован Российским авиационно-космическим агентством в 2002 году.

Достижения современной микроэлектроники способствуют миниатюризации вычислительных и радиотехнических устройств. Главным потребителем плодов этих достижений были и остаются бортовые системы различных автономных объектов. Миниатюризация бортовой аппаратуры летательных и космических аппаратов, телеуправляемых подвижных роботов и манипуляторов, автоматических зондов и т.п., с одной стороны, создаёт условия для расширения круга решаемых задач и наращивания информационной пропускной способности, а с другой стороны, сопряжена с увеличением энергоёмкости автономных объектов и ростом требований к качеству питающей энергии [1].

Стремление увеличить необходимую мощность источников питания противоречит требованию уменьшения массы и объёма всего энергетического комплек-

са. Это противоречие можно разрешить только путём реализации двух процессов: повышения эффективности всех потребителей энергии и повышения эффективности всех преобразователей энергии.

Существенное уменьшение массы и объёма электрооборудования достигается за счёт новых технологий и новых принципов применения источников вторичного электропитания (ИВЭП), коммутационно-защитной аппаратуры, электроприводов и интегрально-гибридных конструкций силовых устройств. Постоянное напряжение в силовой сети становится весьма желательным условием реализации новых систем электрооборудования автономных объектов [2, 3].

В последние годы за рубежом выявлена динамика устойчивого развития ИВЭП как самостоятельных элементов для различных образцов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА); аналогичные процессы

происходят и на отечественном рынке продукции общепромышленного и специального назначения [4]. Модульное направление развития ИВЭП становится особенно важным для создания систем электропитания военной и космической аппаратуры, так как унификация позволяет в короткие сроки создавать надёжную аппаратуру.

Усилия по повышению эффективности систем электропитания (снижение массы, объёма, потерь энергии, повышение надёжности) и обеспечению электромагнитной совместимости ИВЭП в РЭА привели разработчиков бортовой аппаратуры к переходу от централизованной стабилизированной шины электропитания (централизованный принцип построения системы электропитания) к шине нестабилизированного напряжения со стабилизацией и фильтрацией, которые осуществляются непосредствен-

но в функциональном узле или на плате (децентрализованный, или распределённый принцип построения системы электропитания). Упрощённая структурная схема распределённой системы электропитания космического аппарата (КА) показана на рис. 1.

Солнечные батареи, выполненные обычно из кремниевых или арсенид-галлиевых элементов, собирают энергию, которая преобразуется в напряжение. Они соединены с аккумуляторными батареями и вместе с ними образуют источник первичного электропитания КА. Первичное напряжение может быть или преобразовано на уровне подсистемы электропитания в напряжения потребителя (± 5 В, ± 15 В и т. д.), доступные через общие шины, или распределено по нестабилизированной шине КА. Разная аппаратура КА либо непосредственно использует это нестабилизированное напряжение (полезная нагрузка 1), либо нуждается в его стабилизации, которая в современной аппаратуре обычно выполняется с помощью локальных DC/DC-преобразователей, формирующих из напряжения нестабилизированной шины КА напряжение требуемых номиналов для бортовых потребителей (полезная нагрузка 2, полезная нагрузка 3).

Как правило, локальные DC/DC-преобразователи являются устройствами, созданными по гибридной технологии и имеющими в своём составе мощные транзисторы MOSFET, а также разнообразные аналоговые (линейные) и цифровые электронные схемы, такие как ШИМ-контроллеры, диоды и др. Необходимо заметить, что номинальное напряжение промежуточной шины КА равно 27 или 28 В, но в системах с нестабилизированной шиной оно может изменяться в обе стороны на величины до 6...7 В. Следовательно, локальные DC/DC-преобразователи должны быть способны работать в соответствующем диапазоне напряжений, обеспечивая стабилизированные номиналы напряжения

для РЭА. Гибридные модули DC/DC-преобразователей характеризуются небольшими массогабаритными показателями по сравнению с аналогичными изделиями, выполненными на дискретных элементах.

Одной из важнейших характеристик качества модулей DC/DC-преобразователей, предназначенных для применения в составе аппаратуры КА, является радиационная стойкость, которая во многом определяет вероятность безотказной работы соответствующих бортовых систем и, как следствие, величину срока активного существования КА. Создание высокоэффективных надёжных структур радиационно-стойких изделий энергетической электроники является сложной задачей, требующей разработки методов и средств расчёта, моделирования и оптимизации схемотехнических решений, создания и эксплуатации контрольно-измерительного и испытательного оборудования для эффективной отбраковки потенциально дефектных электрорадиоизделий (ЭРИ), разработки методик и специальной аппаратуры для изучения последствий воздействия низкоинтенсивного ионизирующего излучения (пострадиационный эффект) и оценки радиационной стойкости изделий по результатам испытаний на источниках радиационных воздействий.

В настоящее время эти задачи успешно решены, и предлагаются радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи и помехоподавляющие фильтры для применения в бортовой аппаратуре КА, орбиты которых характеризуются комплексным воздействием ионизирующего излучения космического пространства, а также в информационно-измерительных системах контроля радиационной обстановки, в рентгеновских и ядерно-магнитно-резонансных томографах, в промышленных роботах и т.п. [5]. Но такие изделия отличаются высокой стоимостью и дли-



тельными сроками выполнения заказа. При этом очень немногие производители публикуют данные о радиационной стойкости своих изделий с анализом результатов соответствующих испытаний. А между тем именно эти данные позволили бы оптимизировать выбор требуемого изделия вплоть до применения в отдельных случаях «стандартных», или коммерческих, то есть не специфицированных как радиационно-стойкие и поэтому существенно более дешёвых модулей даже в условиях радиационного фона (далее в статье под обобщённым названием «коммерческие изделия» будем понимать широкий круг изделий различного, в том числе военного или промышленного, но не космического назначения).

Далее представлены результаты радиационных испытаний серийно выпускаемых модулей DC/DC-преобразователей компании Interpoint (США), выполненных по гибридной технологии [6, 7], а также приведены результаты испытаний их активных элементов. Кроме того, даны рекомендации для разработчиков систем электропитания и представлены данные о некоторых особенностях ионизирующего излучения космического пространства.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ, УСТОЙЧИВЫХ К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИИ

Разработка модулей электропитания, устойчивых к радиационным воздействиям, требует применения специальных структур преобразователей и выбора ЭРИ с соответствующим образом оптимизированными параметрами.

Итак, первый шаг при разработке транзисторного преобразователя электроэнергии – выбор структуры преобразователя. Преобразователи, которые имеют прямой короткозамкнутый контур от низкоимпедансного источника входной электроэнергии на землю через силовые транзисторы MOSFET, всегда будут чувствительны к одиночным отка-

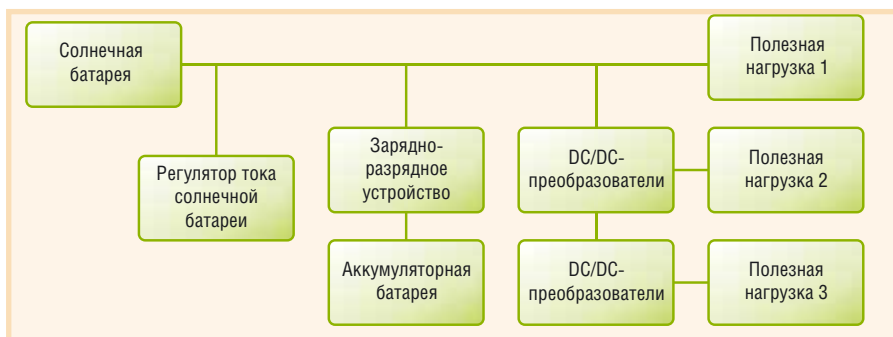


Рис. 1. Упрощённая структурная схема распределённой системы электропитания космического аппарата

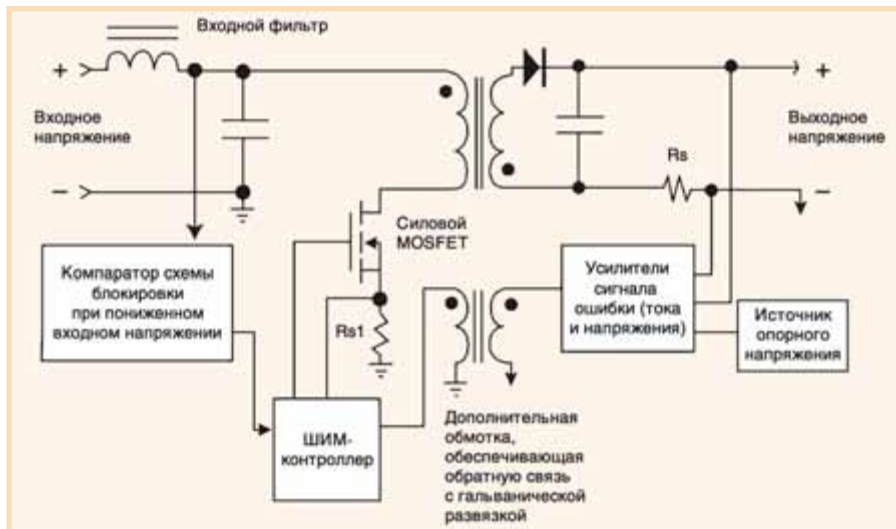
зам. К таким преобразователям относятся полумостовые, двухтактные мостовые преобразователи, двухтактные структуры с поочерёдной работой первичных полуобмоток трансформатора (структура типа push-pull). Напротив, все однотактные прямоходовые и обратногоходовые преобразователи напряжения являются допустимыми.

В цепи основного контура обратной связи по напряжению, служащего для стабилизации выходного напряжения, применение трансформаторной развязки является более предпочтительным по сравнению с оптоэлектронной развязкой. Однако в настоящее время производятся оптопары (компания Isolink), коэффициент передачи тока которых не изменяется при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения [8]. Кроме этого, необходимо заметить, что применение оптронных микросхем в цепи передачи аналогового сигнала обеспечивает лучшие массогабаритные характеристики источников электропитания, технологичность изготовления и хорошие динамические свойства.

Поскольку затронут вопрос выбора соответствующей элементной базы, отметим наиболее критичные компоненты: силовые транзисторы MOSFET, интегральные микросхемы ШИМ-контроллеров, предоконечные каскады для управления силовыми ключами, операционные усилители схемы сравнения, компаратор схемы блокировки при понижении входного напряжения ниже минимального значения и стабилитрон для формирования опорного напряжения. На рис. 2 приведена схема однотактного обратногоходового преобразователя, содержащая перечисленные компоненты.

В конструкции гибридного DC/DC-преобразователя можно реализовать компоновку подложки, приспособленную как для стандартного MOSFET, так и для его радиационно-стойкого аналога: кристалл радиационно-стойкого компонента незначительно больше, поэтому подложка, спроектированная для него, будет пригодна и для компонента обычного исполнения.

Что касается интегрального ШИМ-контроллера, то тут доступны несколько ИМС, которые имеют оптимальные показатели по радиационной стойкости. Вообще говоря, необходимо избегать применения ИМС, созданных по смешанной BiCMOS технологии, например UC1803. Такие компоненты восприимчивы как к поглощённой дозе излучения, так и к радиационным дефектам,



Условные обозначения:

R_s — токоизмерительный резистор основного контура стабилизации выходного напряжения;
 R_{s1} — токоизмерительный резистор контура регулирования дополнительной обратной связи по току дросселя.

Рис. 2. Схема однотактного обратногоходового преобразователя напряжения

вызванным воздействием единичных частиц. При производстве радиационно-стойких модулей DC/DC-преобразователей фирма Interpoint выполняет схемы управления (контроллеры) на дискретных компонентах. Основными компонентами ШИМ-контроллера и схемы обратной связи являются следующие:

- LM119 — компаратор (National Semiconductor),
- LM136 — источник опорного напряжения (National Semiconductor),
- MC34072 — усилитель операционный (Motorola),
- OLQ156 — оптоизолятор радиационно-стойкий (Isolink),
- IRFH110 — радиационно-стойкий транзистор MOSFET (International Rectifier — IR),
- TC4429 — предоконечный каскад для управления силовыми ключами (Microchip).

В условиях действия ионизирующих излучений критичными параметрами для операционного усилителя являются напряжение смещения нуля на выходе или входной ток смещения. Наличие смещения непосредственно влияет на стабилизацию выходного напряжения или регулировку преобразователя в режиме короткого замыкания. В тех случаях когда применяется резистор для измерения выходного тока (токоизмерительный резистор), схема может быть особенно чувствительной к изменениям напряжения смещения, обусловленным влиянием ионизирующих излучений; последствия этого непосредственно сказываются на значении порога включения преобразователя по величине входного напряже-

ния. Кроме того, изменения в стабилизаторе источника опорного напряжения при радиационном воздействии напрямую влияют на стабилизацию выходного напряжения преобразователя, поэтому важно выбрать стойкий стабилитрон для источника опорного напряжения.

При выборе и оценке ЭРИ рекомендуется периодически пользоваться базами данных, поддерживаемыми NASA (<http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/TIDPart.html>) и Министерством обороны США, на предмет получения самой свежей информации о радиационной стойкости электронных компонентов разных производителей, так как эта информация часто меняется. Показатели накопленной дозы для различных ЭРИ, представленные в таблице по указанному адресу, получены при облучении изделий на γ -установке (^{60}Co) при интенсивностях (мощностях поглощенной дозы) 0,01-0,4 рад (Si)/с для различных проектов Goddard Space Flight Center (GSFC). Диапазон уровней поглощённых доз простирается от 2,5 до 100 крад (Si), в зависимости от требований проекта и ожидаемого значения поглощённой дозы для изделия.

Подходы фирмы INTERPOINT К ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВОИХ ИЗДЕЛИЙ

Наиболее популярными моделями DC/DC-преобразователей (конверторов) фирмы Interpoint являются устройства с выходной мощностью от 5 до 30 Вт, предназначенные для монтажа на плату. К ним относятся 5-ваттные преобразователи серии MSA, 15-ваттные преобразова-

тели серии MHF+ и 30-ваттные преобразователи серии MTR. Многие потребители испытывали эти конверторы и пришли к заключению, что некоторые экземпляры сохраняют работоспособность при поглощённой дозе излучения более 50 крад (Si) и невосприимчивы к единичным сбоям (SEU — см. врезку) при воздействии частиц с энергиями порядка 100 МэВ. Конверторы перечисленных серий используются в составе бортовой аппаратуры КА, несмотря на то что они специально не предназначены для применения в условиях комплексного воздействия ионизирующего излучения космического пространства.

Успешное применение модулей Interpoint в ряде космических программ привело к созданию в структуре фирмы нового подразделения, целью которого стали разработка и поставка изделий для удовлетворения потребностей космического сообщества. Первой продукцией подразделения были модификации уже существовавших к тому времени и хорошо себя зарекомендовавших модулей серий MSA и MHF+. Чтобы адаптировать для применений в космических условиях изделия, специально для этого не предназначенные, в них были внесены большие изменения. Эти изменения прежде всего коснулись оптоизоляторов фирмы Hamamatsu (P2824), которые были заменены оптоизоляторами фирмы Isolink (OLQ156). Дополнительные изменения заключались в применении транзисторов MOSFET (IRFH110, IRHC7110) серии Megarad фирмы International Rectifier и конденсаторов повышенной надёжности. Были проведены и другие усовершенствования, соответствующие требо-

ваниям по обеспечению запаса надёжности стандарта MIL-STD-975. Замена поставщика оптоизоляторов была сделана после обширных испытаний на радиационную стойкость [9, 10]. Изделия фирмы Isolink выбраны в качестве основных для радиационно-стойких преобразователей благодаря своей превосходной временной стабильности, устойчивости показателя коэффициента передачи тока и минимальной деградации при поглощённой дозе до 100 крад (Si).

Так появились новые серии SMSA и SMHF. Преобразователи этих серий имеют исполнения с радиационной стойкостью, характеризующейся допустимыми уровнями поглощённых доз излучения 50 или 100 крад. Кроме того, эти устройства были первыми изделиями, радиационная стойкость которых гарантируется в Извлечениях из военного стандарта (Standard Military Drawings — SMD). Компания Interpoint взаимодействовала с Центром по снабжению Министерства обороны США Columbus (DSCC), способствовала оформлению первых SMD с гарантиями радиационной стойкости и разработала систему, одобренную DSCC, для подтверждения радиационной стойкости этих разработок. Interpoint обеспечивает гарантированную радиационную стойкость своих изделий испытанием каждой партии критичных компонентов и отбором только тех из них, параметры которых по результатам радиационных испытаний соответствуют жёстким допускам. Эти проверенные допуски затем используются при анализе пострадиационных электрических характеристик преобразователей.

ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ПРИМЕРЕ УСТРОЙСТВ ОПТИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Все DC/DC-преобразователи фирмы Interpoint имеют гальванически изолированные между собой входные и выходные цепи. Аналоговая обратная связь основного контура стабилизации выходного напряжения необходима для передачи напряжения обратной связи с выхода через изолирующий барьер на вход или в первичную часть конвертора, а также для обработки изменений коэффициента заполнения импульсов управления и регулирования выходного напряжения при изменении входного напряжения и тока нагрузки. В одно- и двухканальных преобразователях серий MSA и MHF+ для гальванической развязки в цепи обратной связи применяются оптронные устройства. В некоторых преобразователях с повышенной выходной мощностью для обеспечения развязки в цепи обратной связи используются трансформаторы небольшой мощности.

На примере устройств оптической изоляции в цепи отрицательной обратной связи конверторов рассмотрим основные виды воздействий проникающей радиации, с которыми приходится сталкиваться в космических условиях.

Изделия для космических применений начали производиться в то время, когда основными проблемами, связанными с воздействием радиации, считались одиночные сбои (SEU), электрический пробой затворов (SEGR) силовых транзисторов MOSFET и суммарная поглощённая доза излучения (Total Ionizing Dose — TID). Изделия поставлялись с соответствующими гарантиями устойчивости к

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗДЕЙСТВИЙ ЕДИНИЧНЫХ СОБЫТИЙ

Single Event Effects (SEE) — обобщённое название приводимых далее видов воздействий единичных событий.

Single Event Upset (SEU) — изменение состояния или переходный процесс, вызванные воздействием на устройство частиц высокой энергии, таких как частицы космических лучей или протоны. Могут иметь место в цифровых, аналоговых и оптических компонентах или оказывать влияние на интерфейсные схемы (подмножество, известное как Single Event Transients — SET). Являются «мягкими» отклонениями, при которых повторное включение устройства или перезапись информации приводят к последующей нормальной работе устройства.

Single Hard Error (SHE) — это SEU, которое служит причиной долговременного изменения в работе устройства. Примером является «залипание» бита в устройстве памяти.

Single Event Latchup (SEL) — состояние, которое вызвано потерей функциональных возможностей устройства по при-

чине единичного события, инициирующего режим высокого тока. SEL может или не может вызвать долговременное повреждение устройства, но требует перезапуска электропитания устройства для возобновления нормального функционирования.

Single Event Burnout (SEB) — состояние, которое может вызвать выход устройства из строя по причине работы силового транзистора в режиме высокого тока.

Single Event Gate Rupture (SEGR) — состояние, которое вызывается единственным ионом в силовом транзисторе MOSFET и которое может иметь результатом образование токопроводящей дорожки в оксидной плёнке затвора.

Multiple Bit Upset (MBU) — результат воздействия единственной высокоэнергетической частицы, такой как частица космических лучей или протон, которая во время своего прохождения сквозь устройство или систему вызывает многократные «некатастрофические» отказы (сбои) или неустойчивые состояния.

данным воздействиям, и испытания подтверждали эти гарантии с требуемым запасом прочности.

В 1995-1997 годах была выявлена иная радиационная угроза, обусловленная эффектами смещения атомов в узлах кристаллической решётки вследствие воздействия со стороны высокоэнергетичных протонов. В отличие от поглощённой дозы кумулятивное воздействие высокоэнергетичных протонов вызывает перманентное повреждение в структуре полупроводниковых материалов и «выбивание» электронов, что порождает ядерные соударения с каскадом последующих повреждений, вызывающих дополнительные соударения.

Влияние этих повреждений впервые было обнаружено в оптоэлектронных устройствах на борту спутника Торех/Poseidon, запущенного в 1992 году в рамках совместного американско-французского проекта. Орбита спутника имела следующие параметры: высота 1336 км, наклонение 66°. Проект был рассчитан на несколько лет, но уже спустя два года начались отказы в работе оптоизоляторов типа 4N49. Это было неожиданным для данных устройств, так как они были испытаны при уровнях радиации свыше 100 крад (Si) и показали лишь небольшую деградацию. Однако испытания проводились на воздействие низкоинтенсивного излучения, а наиболее вероятными причинами этих отказов явились повреждения из-за эффектов смещения, вызванных высокоэнергетичными протонами.

Подобные повреждения являются кумулятивными и обычно характеризуются показателями, измеряемыми в единицах потока частиц/протонов (частицы/см²). Реже они оцениваются через суммарную дозу; к этой оценке прибегают в тех случаях, когда делается ссылка на потерю энергии из-за ядерных соударений или потерю энергии, не связанной с ионизацией (Non-Ionizing Energy Loss – NIEL).

Результатом деградации оптоизолятора является уменьшение коэффициента передачи тока (Current Transfer Ratio – CTR). Наибольший ущерб получается в результате повреждения светодиода излучателя и в гораздо меньшей степени – при повреждении транзисторного детектора.

Важным фактором, определяющим степень деградации устройства под воздействием корпускулярного ионизирующего излучения протонов, является уровень энергии частиц. Энергия протонов измеряется в мегаэлектронвольтах

(МэВ). Как ни парадоксально, но высокоэнергетичные частицы наносят большие повреждения, если их энергия меньше: чем больше отклонение энергии протона в сторону меньших энергий (такое отклонение растёт из-за взаимодействия с заряженными частицами со средними энергиями), тем больше вероятность соударения – всё это справедливо для протонов с энергиями не менее 150 МэВ, при которых повреждение от соударения вызывает дополнительные каскадные повреждения. Что же касается низкоэнергетичных протонов, то они легко экранируются, и, вообще говоря, протоны с энергиями меньше 20 МэВ могут быть проигнорированы из-за местного экранирования металлическими конструкциями КА.

В начале 1997 года в лаборатории радиационных воздействий фирмы Boeing (Boeing Radiation Effects Laboratory – BREL) были проведены испытания значительного количества оптопар различных производителей воздействием корпускулярного ионизирующего излучения протонов. Поток частиц характеризовался значениями, которые достигали 6×10^{10} протон/см². В этих испытаниях принимали участие и оптоизоляторы фирмы Isolink, которые выдержали воздействие протонов с небольшими ухудшениями параметров. Фактически эти ухудшения были гораздо меньшими, чем у других аналогичных устройств, также задействованных в испытаниях.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СЕРИИ MHF+: РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ, ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ, НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ПОЯСНЕНИЯ

История испытаний

В 1995-1997 годах было протестировано множество преобразователей серии MHF+ (рис. 3), и результаты этих испытаний во многом подтвердили ранее сделанные предположения. В частности, подтвердилось, что наиболее чувствительным к воздействию заряженных частиц компонентом, применяющимся в данных преобразователях, является оптоизолятор. Повреждения, вызываемые эффектами смещения атомов в узлах, приводят в результате к уменьшению коэффициента CTR. В конечном счёте, CTR становится настолько низким, что основной контур обратной связи уже не способен обеспечить стабилизацию выходного напряжения в номинальных

пределах. Начальный момент потери регулирования наступает внезапно и приводит к существенному увеличению значения выходного напряжения. При продолжительной экспозиции выходное напряжение будет сохранять повышенное значение во всех режимах. Маловероятным является то, что преобразователь откажет, но аппаратура, питаемая им, может быть повреждена в результате повышения напряжения.

Фирма Interpoint выпускает преобразователь MHF+ с тремя выходами питающих напряжений, который по своей конструкции и топологии сильно отличается от одно-/двухканальных преобразователей этой же серии. Так, трёхканальный преобразователь содержит два оптоизолятора Hamamatsu. На рис. 4 и 5 приведены функциональные схемы одноканального и трёхканального DC/DC-преобразователей серии MHF+. Три экземпляра трёхканального преобразователя были испытаны на циклотроне в Гарварде воздействием потока протонов с энергией 29,1 МэВ. Преобразователи отказали при потоках в диапазоне от $1,3$ до $4,2 \times 10^{10}$ протон/см², среднее значение потока составляло $2,3 \times 10^{10}$ протон/см². Затем эти преобразователи были возвращены в фирму Interpoint, и на них установили оптоизоляторы Isolink. Изделия были вновь подвергнуты испытаниям, и отказы в их работе наблюдались уже при потоках от $3,5$ до $5,83 \times 10^{10}$ протон/см², среднее значение потока составляло $4,84 \times 10^{10}$ протон/см². Таким образом, благодаря оптоизоляторам фирмы Isolink было достигнуто значительное улучшение показателей радиационной стойкости.

Существующие различия в схемотехнике трёхканальных и одно-/двухканальных моделей DC/DC-преобразователей серии MHF+ приводят к тому, что одно-/двухканальные модели способны функционировать при более плотных потоках частиц. Это объясняется, в первую очередь, тем, что в одно-/двухканальных моделях оптоизоляторы функционируют при больших токах и поэтому имеют на 10% больший запас по деградации CTR.

Специалистами NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center) в Медицинском центре университета Loma Linda были подвергнуты дополнительным испытаниям шесть одноканальных и двухканальных преобразователей серии MHF+. Среднее значение потока протонов, при котором наблюдались отказы в работе, составило $5,2 \times 10^{10}$ протон/см². В этих преобразователях применялись оптопары фирмы Hamamatsu (P2824), которые,



Рис. 3. Внешний вид конструкции интегрально-гибридного DC/DC-преобразователя серии MHF+ (представлен вариант исполнения без крепёжных фланцев, крышка снята для проведения испытаний)

в свою очередь, были подвергнуты отдельным испытаниям и показали существенное уменьшение значения коэффициента CTR при потоке $5,5 \times 10^{10}$ протонов/см². Сопоставление результатов, отдельно полученных для оптопар и для изделий в целом, подтверждает гипотезу об оптопаре как самом чувствительном к воздействию ионизирующего излучения компоненте [9, 10], а сравнение средних значений критических потоков для трёхканальных и одно-/двухканальных модулей свидетельствует в пользу большей стойкости именно одно-/двухканальных преобразователей.

Необходимо отметить, что DC/DC-преобразователи серии MHF+ были первыми интегрально-гибридными преобразователями, разработанными в соответствии с требованиями стандарта MIL-STD-883 к устройствам Class H (для военных применений). В 1992 году преобразователи серии MHF+ стали вторыми интегрально-гибридными DC/DC-преобразователями, каталогизированными в SMD под контролем Центра по снабжению электронной техникой Министерства обороны США (Defense Electronics Supply Center –

DESC, ныне DSCC, <http://www.dscclia.mil/Downloads/MilSpec/Smd/92144.pdf>). А в 1997 году фирма Interpoint стала сертифицированным производителем интегрально-гибридных изделий Class K (для космических применений).

Некоторые рекомендации и пример применения

Приведённые результаты испытаний подтверждают, что отказы в работе одно-/двухканальных преобразователей серии MHF+ наступают при потоках свыше 5×10^{10} протонов/см². Такой уровень радиационной стойкости отвечает требованиям многих, если не большинства, космических экспедиций. Именно это значение потока надо использовать при расчётах требуемых защит от воздействия ионизирующих излучений для конкретных условий на орбитальном участке полёта.

Ожидаемый поток протонов может варьироваться в широких пределах и зависит от высоты орбиты, её наклона и степени защиты. Например, спутники на геостационарных орбитах практически не имеют проблем по части по-

глощённых доз протонного излучения, но потоки электронов здесь могут достигать больших величин.

Необходимо принимать во внимание всю совокупность условий эксплуатации в космическом пространстве, чтобы оценить, какие риски существуют для применяемых преобразователей, выполненных по гибридной технологии. Лучшей иллюстрацией этих слов может быть описываемый далее пример применения преобразователей MHF+.

Выявленный эффект повреждения кристаллической решётки высокоэнергетичными протонами вызвал сомнения в возможности применения DC/DC-преобразователей серии MHF+ в проекте CASSINI/CIRES. Данный проект – это экспедиция к Сатурну общей продолжительностью 11 лет, из которых 7 лет предстояло провести в пути и четыре года – на орбите Сатурна. А сомнения были связаны с возможной сильной деградацией оптоизоляторов фирмы Hamamatsu, входящих в состав каждого модуля DC/DC-преобразователя. После многочисленных исследований экспедиция стартовала в октябре 1997 года с преобразователями MHF+, содержащими оптоустройства Hamamatsu. Как было установлено, их деградация под воздействием ионизирующего излучения протонов, поток которых оценивался как $0,5 \times 10^{10}$ протонов/см², не представляет угрозы для экспедиции. Показательно, что главная опасность для этой 11-летней экспедиции была заключена в потоке нейтронов от 33 кг плутония, использующегося на борту в системе подогрева. Источник ионизирующего излучения (ядерный реактор) воздействует на преобразователи постоянным потоком $6,9 \times 10^{10}$ нейтрон/см². В конечном счёте был сделан

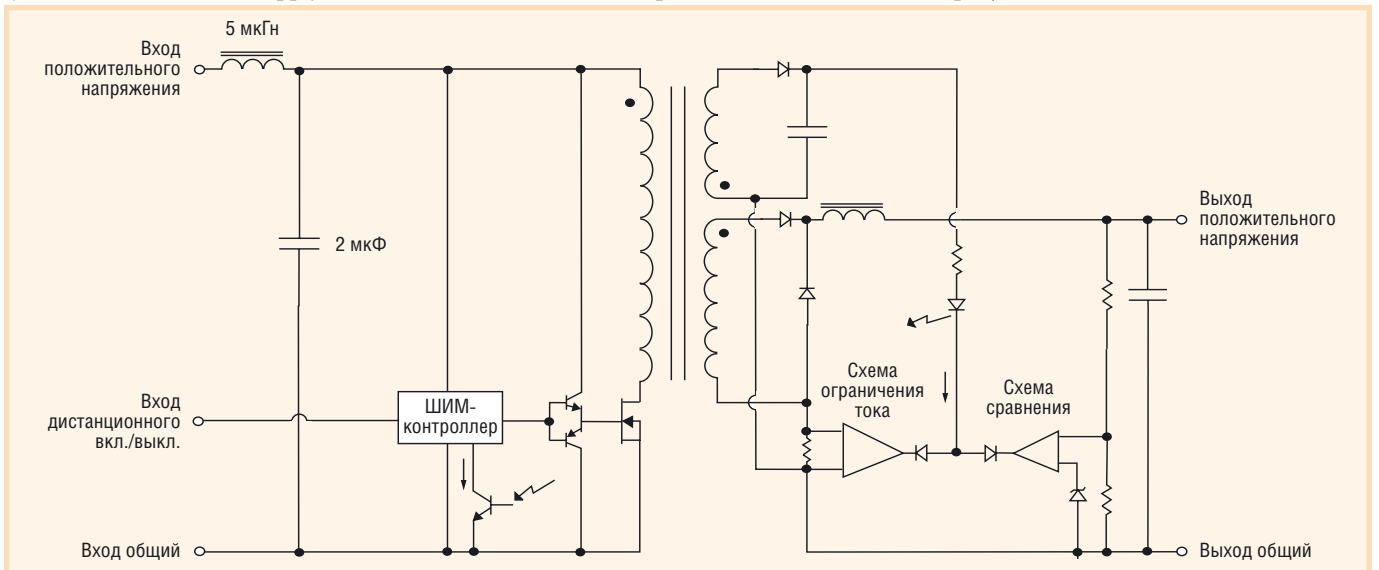


Рис. 4. Функциональная схема одноканального DC/DC-преобразователя серии MHF+, созданного на основе однотактной обратноточковой структуры

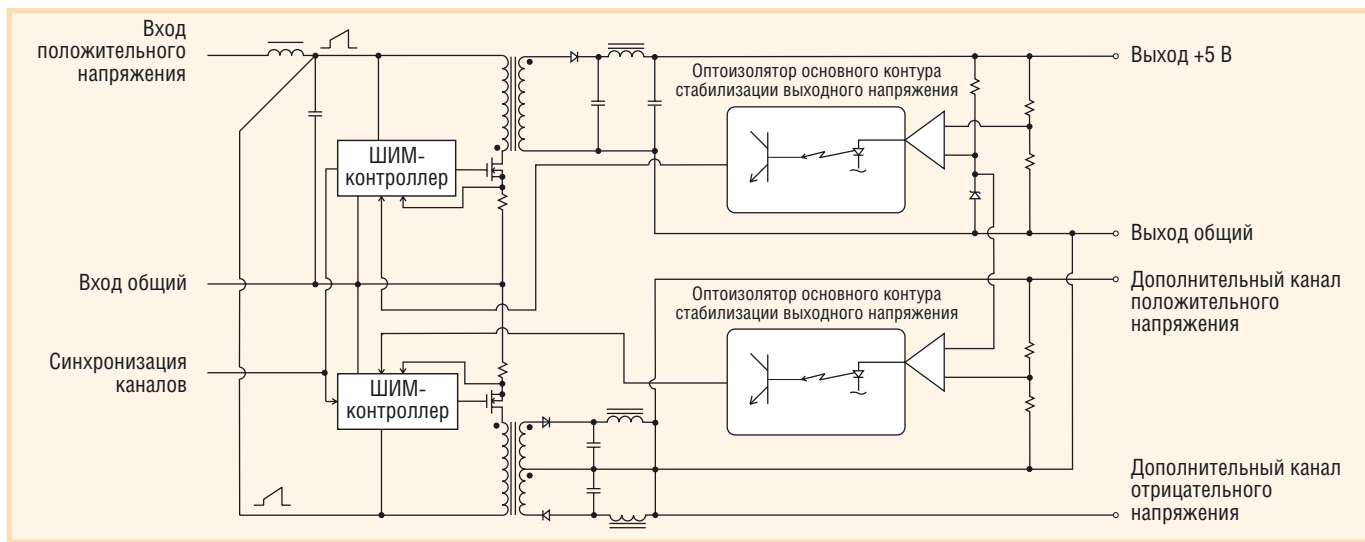


Рис. 5. Функциональная схема трёхканального DC/DC-преобразователя, выполненного с применением метода дуальной фазы/сдвига фазы (Dual-Phase/Phase-Shifted — DPPS), обеспечивающего снижение требований к минимальной нагрузке основного канала, ослабление взаимных влияний между основным и дополнительными выходными каналами, а также уменьшение пульсации во входных и выходных цепях; для прямого регулирования амплитуды тока дросселя посредством сигнала ошибки используется дополнительный контур регулирования (дополнительная обратная связь по току дросселя — ДОСТД)

вывод о необходимости иметь в данных условиях коэффициент запаса, равный 1,5 (или 50%), чтобы обеспечить приемлемую вероятность безотказной работы при совместном радиационном воздействии потоков протонов и нейтронов.

Отдельные пояснения

1. Приемлемую вероятность безотказной работы при радиационном воздействии в условиях применения DC/DC-преобразователей серии МНФ+ в составе бортовой аппаратуры КА в общем случае обеспечивает коэффициент запаса величиной до 3.
2. Для того чтобы добиться значительного проникновения частиц, рекомендуется при испытаниях применять вместо источника γ -излучения изотопа ^{60}Co источник протонов более высоких энергий (от 30 МэВ и выше). Позиция Interpoint по данному вопросу такова: в большинстве случаев испытание на предельную накопленную дозу (ПНД) облучением от источника γ -излучения изотопа ^{60}Co рекомендуется производить с низкой интенсивностью и при открытом корпусе модуля, а при определённом наборе ожидаемых условий эксплуатации преобразователя (такие условия приводятся и описываются далее) дополнительно должны быть проведены испытания с облучением от источника ионизирующего излучения высокой энергии, так как воздействия на электронные компоненты ионизирующих излучений этих двух источников различны.

3. Данное пояснение относится к предостережению о вызываемых протонами неустановившихся токах в оптопарах, используемых в качестве изоляторов дискретных сигналов. В результате таких воздействий появляются ложные сигналы, которые могут привести к сбоям в цифровой аппаратуре. Это предостережение уже фактически неприменимо к ныне используемому в преобразователях Interpoint оптопарам. Подобные скоротечные воздействия игнорируются в основном контуре аналоговой обратной связи.
4. Как было отмечено ранее, из-за различий в топологии и конструкции трёхканальные и одно-/двухканальные модули DC/DC-преобразователей серии МНФ+ показывают разный уровень радиационной стойкости [11]. Поэтому более предпочтительным является применение в составе бортовой аппаратуры КА одно-/двухканальных преобразователей серии МНФ+.

Обеспечение радиационной стойкости

Немало сомнений относительно использования ЭРИ индустриального назначения, для которых параметры радиационной стойкости не регламентированы, породил отчёт NASA/GSFC [12] о возможных отказах этих устройств при работе в космических условиях, вышедший по следам уже описанного отказа на борту Topex/Poseidon в 1994 году. Однако эти сомнения оказались беспочвенными

в свете современных требований к условиям космического полёта и полученных результатов испытаний.

Предел, при котором наступает отказ в работе преобразователей, установлен благодаря многочисленным испытаниям, проведённым в разных местах. Восприимчивые к радиации компоненты выявлены. Испытания на разрушение потоком протонов проводятся при значительно более мощных радиационных воздействиях, чем те, которым подвергается большинство космических аппаратов во время экспедиции. Кроме того, защита, обеспечиваемая стальным корпусом преобразователя и конструкциями КА, увеличивает запас прочности, особенно в отношении низкоэнергетичных частиц. Все перечисленные факторы создают условия для обеспечения требуемой для космических применений радиационной стойкости преобразователей Interpoint.

Учитывая, что оптоизоляторы являются наиболее чувствительными к воздействию заряженных частиц компонентами преобразователей, Interpoint тесно сотрудничает с фирмой Isolink в целях использования в своих изделиях оптоизоляторов новых поколений с более высоким уровнем радиационной стойкости, которые были разработаны для военных применений, характеризующихся корпускулярными ионизирующими излучениями. Эти новые устройства Isolink гарантируют уменьшение коэффициента передачи тока не более чем на 50% после воздействия потока 1×10^{12} протонов/см².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕКОТОРЫХ ПОПУЛЯРНЫХ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Представленная далее информация была подготовлена исключительно с целью использования в качестве руководства для сотрудников центра GSFC, но в настоящее время бесплатно предоставляется как справочный материал другим государственным организациям и подрядчикам, задействованным в космических программах. При использовании этой информации необходимо учитывать следующее:

- информация изначально готовилась только для ознакомления в общих чертах с полученными результатами, и в неё в любое время могут быть внесены изменения и уточнения;
- информация была получена в уникальных условиях лабораторий GSFC, которые могут в значительной степени отличаться от конкретных внешних условий;
- GSFC не гарантирует точность информации в случаях применения изделий в условиях, отличных от уникальных условий лаборатории GSFC;
- приведённые данные не должны быть истолкованы в качестве пред-

ставленных центром GSFC или производителем эксплуатационных характеристик конкретных изделий.

Оценка радиационной стойкости 15-ваттного трёхканального DC/DC-преобразователя MTO2815T/ES

Оценка радиационной стойкости была проведена для определения ПНД конверторов MTO2815T/ES, которые применялись в проекте SMEX. Краткая итоговая сводка результатов испытаний представлена далее. Более подробную информацию можно найти в [13].

Значение накопленной дозы определялось по результатам облучения на γ -установке, в которой в качестве источника ионизирующего излучения использовался радиоактивный изотоп ^{60}Co . Облучению подверглись восемь изделий при постоянно включённом входном напряжении и нагрузках (ток нагрузки основного канала 1 А, ток нагрузки дополнительных каналов $\pm 15 \text{ В}/\pm 0,083 \text{ А}$), а два преобразователя использовались в качестве контрольных образцов. Облучение проводилось в несколько этапов с разными значениями накопленной дозы: 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75 и 100 крад. После накопле-

ния в кремнии компонентов дозы 100 крад изделия подвергались отжигу при 25°C в течение 24 и 168 часов, а затем облучение было продолжено до значений совокупной накопленной дозы 200 и 300 крад. Интенсивность облучения составляла от 0,1 до 5 крад/ч в зависимости от уровня накопленной дозы. После каждого облучения и последующего отжига проверялись электрические параметры в соответствии с условиями испытаний и предельными значениями технических характеристик.

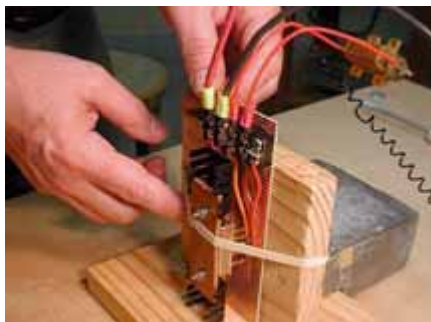
Все восемь образцов полностью прошли испытания до накопленной дозы 50 крад. После 75 крад два образца не прошли контроль по входному току, который достиг значений 34,8 и 30,7 мА против максимального нормированного предельного значения 30 мА. Тем не менее все образцы были подвергнуты дальнейшим испытаниям. После накопленной дозы облучения 100 крад все образцы не прошли контроль по входному току с диапазоном снятых показаний от 37 до 79 мА. Некоторое восстановление наблюдалось после отжига в течение 24 и 168 часов, но у всех образцов сохранялся эффект ухудшения показателей входного тока при прохождении остальных испытаний. После накопленной дозы

200 крэд наблюдалось дальнейшее увеличение значения входного тока. После 300 крэд три образца перестали функционировать; в оставшихся пяти работающих образцах хоть и наблюдалось общее понижение входного тока, но некоторые образцы не прошли испытания из-за недопустимых пульсаций выходного напряжения.

Оценка радиационной стойкости 65-ваттных DC/DC-преобразователей серии MFL

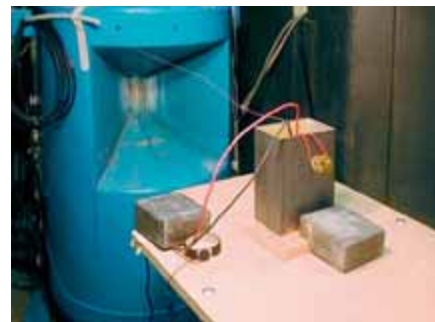
Оценка радиационной стойкости была проведена для определения ПНД преобразователей MFL2805S, MFL2812S, MFL2815S, которые применялись в проекте HST/PCP (Hubble Space Telescope). Подробные результаты испытаний приведены для каждого типа изделий в ряде отчётов [14, 15]. Далее представлены результаты испытаний модели MFL2812S.

Значение накопленной дозы определялось по результатам облучения на γ -установке, в которой в качестве источника ионизирующего излучения использовался радиоактивный изотоп ^{60}Co . Облучению подверглись три образца при постоянно включённом входном напряжении



Установка DC/DC-преобразователя с подключённой нагрузкой для испытания воздействием низкоинтенсивного излучения (позже пассивная нагрузка была заменена на электронную для обеспечения непрерывного мониторинга выходного канала)

28 В и токе нагрузки 0,48 А, а один образец использовался в качестве контрольного. Облучение проводилось в несколько этапов с разными значениями накопленной дозы в кремнии полупроводниковых компонентов: 2,5, 5, 10, 15, 20, 30 и 50 крэд. Интенсивность облучения составляла от 0,04 до 0,29 крэд/ч в зависимости от уровня накопленной дозы. После накопления дозы 50 крэд образцы были подвергнуты отжигу при 25°C в течение 168 часов. На каждом этапе облуче-



Одноканальный DC/DC-преобразователь, установленный перед облучателем ^{60}Co (преобразователь размещён внутри свинцово-алюминиевого кожуха, обеспечивающего мощность дозы 10 крэд (Si)/ч; входное напряжение и ток непрерывно регистрируются компьютером)

ния проверялись электрические параметры в соответствии с условиями испытаний и предельными значениями технических характеристик.

Все образцы были подвергнуты первичным электрическим измерениям и не имели замечаний; без потерь прошли испытания до уровня накопленной дозы 20 крэд. При уровне накопленной дозы 30 крэд у двух образцов отмечалось небольшое превышение (до 12,15 В) предельного значения выходного напряже-

ния при полной нагрузке. Остальные облучённые образцы успешно прошли электрические измерения. При уровне накопленной дозы 50 крад у тех же двух образцов, что и при дозе 30 крад, снова было зафиксировано превышение (12,13 и 12,14 В) предельного значения выходного напряжения при полной нагрузке; электрические измерения проводились после отжига образцов при 25°C в течение 168 часов.

Необходимо заметить, что при испытаниях преобразователей MFL2815S и MFL2805S, которые проводились по методике, аналогичной описанной для MFL2812S, при уровне накопленной дозы 50 крад электрические измерения успешно прошли все образцы.

DC/DC-преобразователи серии MFL (MFL2815D, MFL2815S, MFL2812S и MFL2805S), наряду с другими гибридными изделиями силовой электроники, испытывались на предмет определения пороговых значений линейной передачи энергии (Linear Energy Transfer – LET, или ЛПЭ) корпускулярного ионизирующего излучения для SEU и для единичных воздействий, вызывающих повреждения и обусловленных тяжёлыми ионами, таких как SEL или SEGR. В процессе подобных испытаний определяются и некоторые другие характеристики, но особое внимание уделяется именно LET, так как этот параметр характеризует энергию, которая передаётся некоторой массе, или удельную потерю энергии (измеряется в единицах МэВ×см²/мг). Заметим, что набор детекторов удельных потерь энергии dE/dx используется в спектрометрах, определяющих распределение тяжёлых заряженных частиц по виду, иначе называемых (dE/dx)E-спектрометры. Пороговое значение линейной передачи энергии для SEU определяется как минимальное значение LET, вызывающее эффект SEU при потоке 1×10^6 частиц/см². Пороговые значения линейной передачи энергии для SEL и SEGR определяются как максимальные значения LET, при которых не возникают соответствующие состояния при потоке 1×10^6 частиц/см² [12].

Испытания проводились для оценки радиационной стойкости гибридных изделий в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства, ожидаемых в проектах Composite Infrared Spectrometer и Hubble Space Telescope. Изделия испытывались на установке Single Event Upset Test Facility (SEUTF) лаборатории Brookhaven National Laboratories (BNL). Эта установка использует спаренный составной ускоритель Ван-де-Граафа, который позволяет ускорять тяжёлые частицы (ионы) до энергий, требуемых для осуществления испытаний на SEU. Испытываемые изделия устанавливались на плите внутри вакуумной камеры. Установка SEUTF использует контрольное устройство, управляемое компьютером, и управляющую программу, обеспечивающую удобный для пользователя интерфейс. В испытаниях применялись ионы, представленные в табл. 1.

Методика испытаний

Процедура испытаний была схожей для всех испытываемых изделий.

Испытания были динамическими по своему характеру, а это означает, что все устройства функционировали во время проведения испытаний в тех режимах, в которых они должны были функционировать на борту КА. Устройства были подключены к напряжению 28 В с допустимыми отклонениями до $\pm(6...7)$ В. Выходные каналы постоянно контролировались измерительным устройством Omnilab на базе ПК и другими устройствами испытательной системы, связанными шиной VXI. Все отклонения регистрировались до тех пор, пока или поток не достигал заданного значения, или не возникали условия для разрушения изделия. При угрозе разрушения изделия отключалось питание, обрывался пучок ионов на устройство и испытание заканчивалось преждевременно. Непредвиденные ситуации, зарегистрированные в процессе испытаний, дополнительно анализировались с привлечением, если это было возможно, данных о выходных и управляющих сигналах.

Таблица 1

Ионы, применяемые на установке BNL

Ион	Атомный номер	Энергия, МэВ	LET (удельная потеря энергии), МэВ×см ² /мг
C	12	97	1,46
F	19	136	3,45
Cl	35	208	11,8
Ni	58	262	26,6
I	127	305	59,6
Au	197	329	81,2

Для обеспечения приемлемого компромисса между стоимостью испытаний и их статистической достоверностью в испытаниях было задействовано от двух до трёх образцов устройств каждого типа.

Все образцы испытывались при номинальной температуре +25°C, обусловленной ограничением испытательной установки.

Условия испытаний

Необходимо отметить, что из-за сжатий диаметра пучка ионов на установке BNL и общих габаритов испытываемых гибридных устройств верхняя (ближайшая к выводу 1) и нижняя части каждого из изделий облучались отдельно. Так как компоновки устройств были неизвестны, проводимые испытания на устойчивость к воздействию единичных событий (Single Event Effects – SEE) были подобны реализации метода «чёрного ящика». Только в случаях, когда имели место аномальные (влияющие на функциональность устройства) результаты, производился ограниченный послеиспытательный анализ, выясняющий состояние отдельных компонентов внутри интегрально-гибридных конструкций и их влияние на полученные результаты.

Индивидуальные нагрузки для испытываемых устройств выбирались на основе требований GSFC, особенностей используемого испытательного оборудования и температурных параметров гибридных сборок.

Процесс испытания на SEE

Во время облучения испытываемый образец работал синхронно с эталонным. Параллельно с этим осуществлялся контроль с целью выявления отклонений четырёх возможных типов:

- продолжающиеся более 1 мкс устойчивые состояния и отклонения, которые проявлялись в расхождениях выходных характеристик эталона и испытываемого образца;
- продолжающиеся менее 1 мкс отклонения в виде выбросов или переходных процессов, которые проявлялись в расхождениях выходных характеристик эталона и испытываемого образца;
- разрушительные отклонения, вызванные протеканием большого тока (SEL и SEGR);
- функциональные сбои (описываются в заключительных разделах статьи).

Результаты испытаний

Данные, приведённые в табл. 2, резюмируют результаты испытаний для каж-

Таблица 2

Краткая сводка результатов испытаний DC/DC-преобразователей серии MFL

Испытываемый образец	Отклонения типа устойчивый сбой или выброс	Разрушительные отклонения	Другие условия
MFL2815D	Произошёл особый случай отклонения типа устойчивый сбой (при значении LET 45...59,7 МэВ×см ² /мг), потребовавший повторного включения питания	Отсутствовали вплоть до максимального значения LET 72 МэВ×см ² /мг (34 В вход)	Не наблюдались
MFL2815S	Отсутствовали	Отсутствовали вплоть до максимального значения LET 72 МэВ×см ² /мг (34 В вход)	Не наблюдались
MFL2812S	Только выброс (при значении LET 50 МэВ×см ² /мг)	Отсутствовали вплоть до максимального значения LET 72 МэВ×см ² /мг (34 В вход)	Не наблюдались
MFL2805S	Отсутствовали	Отсутствовали вплоть до максимального значения LET 72 МэВ×см ² /мг (34 В вход)	Не наблюдались

ного устройства серии MFL. Прокомментируем результаты, полученные для моделей MFL2815D и MFL2812S.

MFL2815D: особое состояние установившегося отклонения наблюдалось, когда выходное напряжение устройства упало ниже номинального значения 15 В до устойчивого состояния 14 В. Для выхода из этого состояния и возврата к нормальному функционированию потребовалось повторное включение питания испытываемого образца. Причина этого провала напряжения не была исследована, так как требования проекта не соответствовали существенно завышенной величине LET.

Понижение выходного напряжения, которое произошло при облучении одной из половин основания испытываемого образца, имело место при величине значения LET между 45 и 59,7 МэВ×см²/мг. Только один этот спорадический случай во время испытания не позволил провести статистическую оценку явления. Во время испытания не наблюдалось других SEE ни на одном из образцов при изменении LET вплоть до максимального значения 72 МэВ×см²/мг.

MFL2812S: при испытании этих устройств наблюдалось такое отклонение, как выброс, который продолжался менее 20 нс, после чего выходное напряжение вернулось к нормальному значению. Этот выброс менее чем на 1 В превысил выходное напряжение эталонного устройства. Такое резкое повышение выходного напряжения произошло при облучении одной из половин основания испытываемого образца и имело место при величине значения LET примерно 50 МэВ×см²/мг.

В ходе испытаний не было отмечено значительных отклонений ни на одном из образцов при изменении LET вплоть до максимального значения 72 МэВ×см²/мг.

Рекомендации для разработчиков аппаратуры КА

Разработчики бортовой аппаратуры КА предпочитают трактовать результаты испытаний просто: можно либо нельзя. К сожалению, результаты испытаний на воздействие единичных событий никогда не были простыми и исчерпывающе однозначными. Компромиссом можно считать распределение устройств по результатам испытаний на SEE по четырём категориям:

- Category 1 – изделия рекомендуются для применения во всех типах КА;
- Category 2 – изделия рекомендуются для применения в КА, но могут потребовать принятия некоторых мер для ослабления влияния SEE;
- Category 3 – изделия рекомендуются для применения в некоторых КА, но требуют применения всесторонних мер для ослабления влияния SEE или обеспечения режима возврата в рабочее состояние после SEL;
- Category 4 – изделия не рекомендуются для применения ни в одном КА.

К устройствам Category 1 причислены MFL2815S, MFL2805S.

К Category 2 отнесены конверторы MFL2815D, MFL2812S. Значения LET, при которых возникают SEE, являются достаточно высокими, поэтому допускается применение данных конверторов без принятия каких-либо мер по ослаблению влияния SEE. Тем не менее как

минимальное требование рекомендована организация точек спутниковой телеметрии для контроля напряжений и токов.

Оценка радиационной стойкости одноканальных и двухканальных 10-ваттных DC/DC-преобразователей серии MHF

Оценка радиационной стойкости была выполнена для определения ПНД конверторов MHF2805S и MHF2812D, которые планировались для применения в проекте CASSINI/CIRS. Подробная информация с результатами испытаний для каждого типа изделий приведена в отчёте [16]. С её помощью можно оценить влияние ионизирующего излучения на энергетические и точностные показатели изделий (кпд, нестабильность в сети, нестабильность в нагрузке, пульсация выходных напряжений, рабочая частота преобразования).

Экспериментальные исследования радиационной стойкости проводились на γ -установке, в которой в качестве источника ионизирующего излучения использовался изотоп ⁶⁰Co. Во время испытаний облучению подвергались по два образца каждой модели, подключённых к первичной сети и нагрузке (входное напряжение 28 В постоянного тока, 20-омная нагрузка для MHF2805S и 184-омные нагрузки на выходе каждого канала MHF2812D), а по одному изделию каждой модели было использовано в качестве контрольного образца. Облучение проводилось в несколько этапов с разными значениями накопленной дозы в кремнии: 2,5, 5, 7,5, 10, 15, 20, 30 и 50 крад. Интенсивность облучения (мощность поглощённой дозы) составляла от 0,08 до 1,18 крад/ч. После каждого этапа облучения и последующего отжига проверялись электрические параметры образцов в соответствии с допустимыми предельными значениями. Предварительно все образцы были подвергнуты электрическим измерениям и эксплуатационным испытаниям (температурные, влажностные, вибрационные испытания, испытания на воздействие пониженного и повышенного давления газа). В результате все образцы MHF2812D, подвергнутые радиационному воздействию, успешно прошли электрический параметрический контроль на протяжении всех этапов облучения и отжига.

Все образцы MHF2805S, подвергнутые радиационному воздействию, успешно прошли электрический параметрический и функциональный контроль только

до уровня накопленной дозы 15 крад (Si). После дозы 20 крад у одного из образцов выходное напряжение снизилось до значения 3,17 В, что ниже минимально допустимого при максимальной нагрузке предела 4,95 В. У этого же образца до 67% снизился КПД, против минимально допустимого значения 75%, а также были превышены допустимые значения показателей нестабильности по току и напряжению. Всё это свидетельствовало о том, что при таком уровне накопленной дозы данный образец в условиях полной нагрузки проявляет серьёзное ухудшение своих рабочих характеристик.

После накопления дозы 30 крад значения выходного напряжения при полной нагрузке у обоих образцов МНФ2805S упали ниже минимального специфицируемого предельного значения. Кроме того, у них снизился КПД и увеличились показатели нестабильности по току и напряжению. На этом же уровне дозы оба образца подверглись повторному испытанию, но уже при половинной нагрузке. В результате они продемонстрировали в допустимых пределах значения выходного напряжения и показателей нестабильности по току и напряжению, а КПД составили 73,96% и 73,88%, то есть совсем немного ниже минимально допустимого значения

75% (впрочем, снижение КПД при половинной нагрузке — явление обычное).

После достижения уровня накопленной дозы 50 крад оба образца МНФ2805S в условиях полной нагрузки показали возросшее ухудшение характеристик.

После отжига при 25°C в течение 168 часов у одного из образцов восстановились все электрические характеристики, за исключением показателей нестабильности по напряжению, а у другого образца восстановились все электрические параметры, за исключением значения КПД, которое составило 74,998% — чуть ниже минимально допустимого.

Интересно, что после отжига при 100°C в течение 168 часов эффектов восстановления (rebound) не обнаружилось. Здесь необходимо отметить, что применение радиационно-термической обработки на уровне пластин позволяет достичь нового уровня качества и надёжности серийно выпускаемых ИС МОП, в том числе и обеспечить стойкость ИС к воздействию ионизирующих излучений [17]. Этот эффект достигается облучением устанавливаемой в соответствии с условиями эксплуатации дозой гамма-квантов с удалением из партии изделий, не удовлетворяющих заданным требованиям, и последующим отжигом образ-

цов, выдержавших испытания, с целью возвращения значений их параметров в исходное состояние. Но модули DC/DC-преобразователей содержат не только ИС МОП, но и BiCMOS, биполярные ИС, у которых другой механизм проявления пострадиационного эффекта.

Описанные испытания подтвердили, что чувствительные к радиационным воздействиям параметры зависят от режима функционирования устройства.

Оценка радиационной стойкости одноканального 10-ваттного DC/DC-преобразователя МНВ283R3S

Оценка радиационной стойкости была выполнена для определения ПНД конвертора МНВ283R3S, который планировался для применения в проекте SMEX. Подробная информация с результатами испытаний для каждого типа изделий приведена в отчёте [18]. По этой информации можно оценить влияние ионизирующего излучения на энергетические и точностные показатели изделий (КПД, нестабильность в сети, нестабильность в нагрузке, пульсация выходных напряжений, рабочая частота преобразования).

Экспериментальные исследования радиационной стойкости проводились на γ -установке, в которой в качестве источника ионизирующего излучения использовался изотоп ^{60}Co с энергией примерно 1,25 МэВ. Во время радиационных испытаний облучению подвергались три образца изделия, подключённых к первичной сети и нагрузке (входное напряжение 28 В постоянного тока, 10-омная нагрузка), а один образец использовался в качестве контрольного. Облучение проводилось в несколько этапов с разными значениями накопленной дозы в кремнии: 5, 10, 15, 20, 30 и 50 крад. Интенсивность облучения (мощность поглощённой дозы) составляла от 0,06 до 1,250 крад/ч (от 0,017 до 0,35 рад/с). Предварительно все образцы были подвергнуты электрическим измерениям и эксплуатационным испытаниям (температурные, влажностные, вибрационные испытания, испытания на воздействие пониженного и повышенного давления газа).

После накопления дозы 10 крад образцы были подвергнуты отжигу при 25°C в течение 360 часов, а при дозе 50 крад они прошли заключительный отжиг при 25°C в течение 168 часов.

При измерении электрических характеристик после получения дозы 5 крад все образцы продемонстрировали значительное усиление нестабильности по току. У двух образцов предельное значение показателя нестабильности 50 мВ было превышено до значений 142 и 58,7 мВ. Все другие электрические тесты образцы прошли нормально.

При измерении электрических характеристик после накопления дозы 10 крад у всех трёх образцов было превышено предельное значение показателя нестабильности по току до значений 553, 519 и 222 мВ. Все другие электрические тесты образцы прошли нормально. После отжига всех трёх образцов при 25°C в течение 360 часов было обнаружено некоторое уменьшение нестабильности по току до значений 365, 313 и 97 мВ, и снова все другие электрические тесты всеми образцами были пройдены нормально.

После достижения уровня накопленной дозы 15 крад у всех трёх образцов продолжалось усиление нестабильности по току, показатели нестабильности достигли значений 755, 702 и 410 мВ. У двух образцов предельное значение показателя нестабильности по напряжению 20 мВ было превышено до значений 214 и 198 мВ. Все другие электрические тесты образцы прошли нормально.

При дозе 20 крад у двух образцов было превышено специфицированное предельное значение выходного напряжения до значений 3,55 и 3,58 В. У всех образцов ещё больше усилилась нестабильность по току и достигла значений 847, 790 и 639 мВ, а нестабильность по напряжению возросла до 287, 290 и 108 мВ. Все другие электрические тесты образцы прошли нормально.

После накопления дозы 30 крад у всех образцов увеличилось превышение специфицированного предельного значения выходного напряжения до значений 3,98, 4,02 и 3,63 В, нестабильность по току характеризовалась возросшими значения-

ми 1028, 960 и 771 мВ, а нестабильность по напряжению — также возросшими значениями 426, 438 и 296 мВ. Все другие электрические тесты образцы прошли нормально.

После достижения уровня накопленной дозы 50 крад у всех образцов продолжилось ухудшение показателей выходного напряжения (до 4,56, 4,59 и 4,13 В), а также отмечалось дальнейшее усиление нестабильности по току (до 1171, 1094 и 912 мВ) и по напряжению (до 719, 604 и 400 мВ). У одного из образцов было незначительно превышено предельное значение входного тока 30 мА при холостом ходе до значения 30,2 мА. Все другие электрические тесты образцы прошли нормально.

Примечательно, что после 168-часового отжига при температуре 25°C у всех образцов не было отмечено никакого восстановления параметров, ухудшились показатели выходного напряжения, усилились нестабильности по току и напряжению.

Оценка радиационной стойкости одноканальных DC/DC-преобразователей серии MTR

Оценка радиационной стойкости была выполнена для определения ПНД популярных одноканальных DC/DC-преобразователей MTR2805SF и MTR2815SF, которые планировались для применения в проекте TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) — совместном научном проекте США и России, проводимом на борту КА «Метеор-3». Кстати, это был первый проект NASA, где применялся в космических условиях полупроводниковый регистратор на базе матрицы ИМС ОЗУ (Hitachi 256 кбит, 32Кx8). Подробная информация с результатами испытаний для каждого типа изделий приведена в отчётах [19, 20].

Экспериментальные исследования радиационной стойкости проводились на γ -установке, в которой в качестве источника ионизирующего излучения использовался изотоп ^{60}Co . Во время испытаний облучению подвергались по три образца каждой модели, подключённых к первичной сети и нагрузке (входное напряжение 28 В постоянного тока, 50-омная нагрузка), а по одному изделию каждой модели было использовано в качестве контрольного образца. Облучение проводилось в несколько этапов с разными значениями накопленной дозы в кремнии: 2,5, 5, 7,5, 10, 15, 20, 30, 50 и 100 крад. Интенсивность облучения

(мощность поглощённой дозы) была 0,32 крад/ч (0,09 рад/с). После достижения дозы 100 крад образцы подверглись отжигу при подключенном входном напряжении и температуре 25°C в течение 168 часов. После каждого этапа облучения и последующего отжига проверялись электрические параметры образцов в соответствии с допустимыми предельными значениями. Предварительно все образцы были подвергнуты электрическим измерениям и эксплуатационным испытаниям (температурные, влажностные, вибрационные испытания, испытания на воздействие пониженного и повышенного давления газа).

Все образцы модели **MTR2805SF** прошли все виды испытаний до уровня накопленной дозы 50 крад без заметных ухудшений контролируемых электрических параметров. После накопления дозы 100 крад были обнаружены значительные ухудшения показателей выходного напряжения, кпд, нестабильности по току, нестабильности по напряжению и пульсаций выходного напряжения. У всех образцов существенно снизились выходное напряжение (588...679 мВ при минимально допустимом значении 4,95 В) и кпд (33,4...37,8% при минимально допустимом значении 76%). У всех образцов были превышены показатели нестабильности по току (4,3...4,4 В при максимально допустимом значении 50 мВ) и пульсации выходного напряжения (424...524 мВ от пика до пика при максимально допустимом значении 50 мВ от пика до пика). У одного из образцов было превышен показатель нестабильности по напряжению (61,4 мВ при максимально допустимом значении 50 мВ).

После 168-часового отжига при температуре 25°C у всех образцов был превышен предел входного тока 35 мА до значения 2 А. Такой большой ток не специфицирован для данной модели, поэтому заведомо малодостоверными представлялись в этих условиях результаты измерения выходного напряжения, кпд и показателя нестабильности по напряжению. С другой стороны, все образцы после отжига продемонстрировали существенное уменьшение нестабильности по току и пульсаций выходного напряжения.

У всех испытываемых образцов модели **MTR2815SF** до уровня накопленной дозы 50 крад не было выявлено существенных ухудшений электрических параметров. При дозе 15 крад у одного образца незначительно уменьшился кпд (79,5% при предельно допустимом значении

81%), однако при дозе 20 крад его кпд восстановился до 82,7%. При дозе 30 крад у другого образца тоже незначительно уменьшился кпд (до 80,4%), однако после дозы 50 крад его величина составила 84,0%.

При электрических измерениях после достижения накопленной дозы 100 крад у всех образцов обнаружилось резкое увеличение входного тока (от 35 мА до 2 А). После их отжига при 25°C в течение 168 часов один образец успешно прошёл все электрические тесты, у другого отмечалось лишь незначительное снижение кпд (до 77,8%), а у третьего было немного превышено предельное значение показателя нестабильности по току (30,5 мА при пределе 30 мВ), а также остался большим входной ток (2 А), что не позволило с должной степенью достоверности оценить выходное напряжение, кпд и нестабильность по напряжению.

Виды испытаний радиационно-стойких изделий

Раздел, посвящённый описанию исследований радиационной стойкости DC/DC-преобразователей, изначально не специфицированных как радиационно-стойкие изделия, был бы неполным, если в нём не рассказать, каким видам испытаний подвергаются радиационно-стойкие конвертеры фирмы Interpoint. Такая информация позволит более объективно оценить представленные в данном разделе результаты исследований.

Прежде всего необходимо отметить, что нынешняя методика испытаний радиационно-стойких изделий микроэлектроники с целью определения ПНД на установках с изотопом ⁶⁰Co – Method 1019.6 Ionizing Radiation (Total Doze) Test Procedure – входит в военный стандарт США MIL-STD-883F [21]. В настоящее время радиационно-стойкие изделия фирмы Interpoint на этапе разработки проходят усовершенствованные испытания на воздействие ионизирующего излучения низкой интенсивности (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity – ELDRS) при мощности дозы 0,005 рад (Si)/с в течение более 1000 часов, что приблизительно соответствует интенсивности облучения на орбите. Ранее при испытаниях радиационно-стойких модулей DC/DC-преобразователей в процессе их разработки фирмой Interpoint применялось воздействие более высокой мощности дозы – 9 рад (Si)/с; такое значение мощности дозы было выбрано много лет назад как наиболее эффективное для выявления отклонений.

По предыдущей версии стандарта MIL-STD-883E, Method 1019.4 для определения ПНД радиационно-стойких изделий микроэлектроники рекомендовалось придерживаться диапазона интенсивности облучения от 50 до 300 рад (Si)/с, чему и следовала фирма Interpoint.

Для оценки восприимчивости компонентов к низкоинтенсивному ионизирующему излучению проводятся испытания ELDRS, которые распространяются на изделия фирмы, демонстрирующие повышенную вероятность отказов при мощности дозы ниже 50 рад (Si)/с. Эффект влияния низкоинтенсивного ионизирующего излучения обнаруживается у многих биполярных устройств. Так, он был обнаружен у ИМС компаратора LM119. Такое излучение, помимо прямого действия, способно увеличить суммарную дозу, что позже может проявиться в виде некоторых пострадиационных эффектов. Это может произойти даже при чрезвычайно низких значениях мощности дозы, в тех случаях когда они достигнут величины интенсивности релаксации дозы в процессе отжига. Данный эффект был обнаружен во время оценки ПНД кристалла драйвера TC4426 на установке JPL (Jet Propulsion Laboratory – Лаборатория реактивного движения).

Факторы, определяемые условиями применения

Накопленная доза и воздействия SEE

Экспериментальные исследования с целью оценки радиационной стойкости интегрально-гибридных DC/DC-преобразователей фирмы Interpoint, изначально не специфицированных как радиационно-стойкие изделия, показывают, что значения ПНД для них могут находиться в пределах от 5 до 50 крад (Si) и имеют значительный разброс для изделий одного типа, для изделий разных партий, а значения чувствительных к радиационным воздействиям параметров зависят от режима функционирования устройства. При использовании полученных в ходе исследований результатов надо учитывать, что при оценке ПНД спектральный состав и интенсивность облучения отличаются от соответствующих характеристик реальных излучений космического пространства, и это является одной из причин погрешности в определении ПНД [22].

Современные подходы к проблеме радиационной стойкости в NASA, военном и коммерческом космических секторах

США способствуют утверждению технологий COTS (Commercial Off-The-Shelf – готовые к использованию модули коммерческого назначения) в космических применениях. Однако необходимо учитывать некоторые специфические факторы для обеспечения надёжного функционирования аппаратуры КА в условиях ионизирующего излучения, которое может создать проблемы на всех представляющих интерес орбитах. Нужно ясно осознавать эти проблемы, главными из которых являются преждевременный отказ устройств вследствие полученной суммарной дозы, а также устойчивый отказ или случайные сбои из-за воздействия заряженных частиц (корпускулярного излучения).

Обычно большинство специалистов рассматривают радиационную стойкость аппаратуры и конструкций КА только с точки зрения ПНД. Влияние накопленной дозы сказывается в том, что в результате долговременного поглощения радиации электроны покидают атомы и количество свободных электронов накапливается. Между тем, пагубные последствия могут иметь и воздействия типа SEE, вызванные прохождением одиночной заряженной частицы через устройство. Эффект от SEE начали принимать

во внимание относительно недавно (в начале 90-х и даже позже), поэтому многие специалисты остаются всё ещё несведущими в данном вопросе, не понимают серьёзности потенциальной опасности SEE и не учитывают её в своих проектах. Другим видом заблуждения является попытка в рамках конкретного проекта свести спецификацию SEE к единственному числу – это заведомо нецелесообразно, так как на разных участках полёта, в разных отсеках, при разной ориентации аппаратура КА имеет различные критические относительно SEE режимы. Таким образом, если разработчик выбрал устройство с SEE, оцененными с некоторой вероятностью по результатам наземных испытаний, необходимо провести дополнительные исследования интенсивностей SEE, исходя из определённых условий применения в конкретном проекте. Однако это не так просто. Для этого нужно определить ожидаемую радиационную обстановку с некоторой степенью точности, собрать максимально полные и точные данные о соответствующих испытаниях. Затем должны быть получены ответы на разнообразные вопросы по результатам испытаний, например: было ли устройство испытано в таком же рабочем режиме, в ка-

ком оно будет использоваться в полёте; проявились ли вторичные эффекты, такие как MBU или «залипшие» биты; как зависят результаты от тактовой частоты работы устройства и т.д.? В процессе исследований потребуются знания разработчика о функционировании схемы, а также сведения о предполагаемой орбите (траектории) и окружающем её пространстве. В результате недостаточно сказать, что устройство непригодно из-за чувствительности к SEE, а природа такой SEE-чувствительности устройства должна быть понята и, если требуется, должны быть установлены способы её ослабления посредством, например, использования резервных устройств, изменения рабочих режимов, применения сторожевого таймера, добавления схем обнаружения и исправления ошибок, ограничения тока и т.д. А использовать такие SEE-чувствительные устройства следует только в том случае, когда требования проекта допускают реализацию решений, направленных на ослабление SEE.

Здесь надо сделать следующее предупреждение: зачастую интенсивность SEE характеризуется в проектах как MTTF (mean time to failure – значение времени до отказа; применяется для устройств, которые отказывают и не восстанавливаются) – так вот, это ошибочно, так как интенсивность SEE раз в пять лет говорит о том, что событие равновероятно может произойти в любое время в течение всего пятилетнего периода, а не по истечении данного срока.

Влияние высокоэнергетических космических частиц

Основными источниками высокоэнергетических частиц, которые вносят вклад в накопление дозы и происхождение SEE, являются:

- протоны и электроны, захваченные в поясах Ван Аллена;
- галактические космические лучи (ГКЛ) из протонов и тяжёлых ионов;
- потоки протонов и тяжёлых ионов от солнечных вспышек (солнечные космические лучи – СКЛ).

Тяжёлые ионы, захваченные магнитосферой, не оказывают большого влияния на накопленную дозу, но обладают энергией, достаточной для проникновения в КА, ионизации и инициации SEE. Для оценки ПНД должны быть рассмотрены влияние захваченных протонов и электронов, а также вторичное тормозное излучение протонов ГКЛ и СКЛ. Часть накопленной дозы, вызванная ионами

ГКЛ, является незначительной при наличии других перечисленных источников. Для оценки уровня опасности SEE должны быть рассмотрены ионы ГКЛ, захваченные магнитным полем Земли протоны и протоны СКЛ.

Энергетические параметры всех этих источников зависят от активности Солнца. Солнечный цикл делится на две фазы: минимум активности и максимум активности. Обычный цикл длится около 11 лет с приблизительно 4-летним периодом минимума солнечной активности и 7-летним периодом максимума солнечной активности.

Протоны и электроны, захваченные в поясах Ван Аллена

Современные электронные компоненты высокой плотности значительно более чувствительны к протонам, чем к тяжёлым ионам. Даже дополнительными экранами трудно защититься от высокоэнергетичных протонов, которые являются причиной SEE и значительно содействуют накоплению дозы излучения, нормированной по массе полупроводниковой аппаратуры КА:

$$D = \Delta E_p / \Delta m,$$

где D – полученная доза излучения; ΔE_p – энергия любого вида излучения, переданная некоторой массе Δm облучаемого вещества (измеряется в дж/кг, или рад; энергия, поглощаемая кремнием (Si), равна 0,01 дж/кг).

Любые мероприятия, направленные на ослабление SEE, только тогда будут эффективны, когда будут базироваться на точном определении областей распределения захваченных протонов, их энергетических параметров и возможных изменений.

Захваченные электроны занимают области космоса, известные как внутренний пояс (простирается за пределы порядка 2,4 радиуса Земли на экваторе) и внешний пояс (примерно от 2,8 до 12 радиусов Земли на экваторе). Уровни интенсивностей и реальные физические границы зависят от энергии частицы, от многолетних изменений магнитного поля, магнитных возмущений, колебаний солнечного цикла и отдельных солнечных событий. Внешний пояс характеризуется на порядок более высокой интенсивностью и более высокими энергиями, чем внутренний пояс.

Захваченные протоны не могут быть сгруппированы в зонах внутреннего и внешнего пояса. Приблизительная граница области для захваченных протонов с энергиями больше 10 МэВ находится на расстоянии 3,8 радиуса Земли. Протяжённость этой области тоже зависит от

многолетних изменений магнитного поля, магнитных возмущений, колебаний солнечного цикла и отдельных солнечных событий.

Энергетические параметры захваченных частиц вычисляются с использованием моделей NASA AP8 и AE8. Модели имеют варианты для минимума и максимума солнечной активности, но во всём остальном являются статичными и не отражают значительных перемен, связанных с геомагнитными бурями и изменениями магнитного поля Земли. Вследствие этого потоки захваченных частиц по данным моделям представлены совокупностью ненаправленных интегрированных интенсивностей, которые, как ожидается, будут накоплены в среднем за шестимесячный период.

Протоны и тяжёлые ионы ГКЛ

Частицы ГКЛ возникают за пределами Солнечной системы. Они представлены ионами всех элементов с атомными числами от 1 до 92. Уровни интенсивности потоков этих частиц ниже, но, из-за того что среди них есть чрезвычайно высокоэнергетичные частицы таких тяжёлых элементов, как железо, они, проходя через вещество, вызывают сильную ионизацию. Подобно высокоэнергетичным захваченным протонам, частицы ГКЛ плохо поддаются экранированию и поэтому создают существенную опасность для электронной техники в плане SEE.

Как и распределение захваченных протонов, распределение частиц ГКЛ изменяется вместе с солнечным циклом. Их пик приходится на время минимума солнечной активности, а наименьший уровень – на время солнечного максимума. Магнитное поле Земли обеспечивает КА изменяющимися степенями защиты от космических лучей, зависящими в основном от наклона и высоты орбиты.

Протоны и тяжёлые ионы СКЛ

В период минимума солнечной активности происходят несущественные вспышки.

Во время каждой фазы максимума солнечной активности может происходить по несколько больших вспышек. Эти явления длятся от нескольких часов до нескольких дней, а энергия солнечных частиц при этом может достигать нескольких сот МэВ. Подобно потокам частиц ГКЛ, потоки частиц СКЛ тоже ослабляются магнитосферой Земли.

Существуют различные модели ГКЛ и СКЛ, наиболее актуальные и часто ис-

пользуемые из них представлены в табл. 3 [23].

Влияние параметров орбиты

Величина накопленной дозы, виды и последствия воздействий SEE сильно разнятся у разных КА. Это во многом определяется орбитами (траекториями) конкретных аппаратов, пересекающими потоки частиц от разных источников, с различными энергетическими характеристиками.

Далее даны краткие характеристики орбит, представляющих наибольший практический интерес, а в таблицах 4, 5, 6 приведены подготовленные компанией

Таблица 3

Источники радиации, их особенности и модели

Источник радиации	Модель	Зависимость от солнечного цикла	Факторы, влияющие на уровень радиации	Типы соответствующих орбит
Захваченные протоны	AP8-MIN; AP8-MAX	Минимум солнечной активности — влияние частиц наиболее сильное; максимум солнечной активности — наиболее слабое	Искажения геомагнитного поля, солнечные вспышки, магнитные бури	LEO, NEO, переходные орбиты
Захваченные электроны	AE8-MIN; AE8-MAX	Минимум солнечной активности — влияние частиц наиболее слабое; максимум солнечной активности — наиболее сильное	Искажения геомагнитного поля, солнечные вспышки, магнитные бури	LEO, GEO, NEO, переходные орбиты
Ионы ГКЛ	CREME; CHIME; Badhwar & O'Neill	Минимум солнечной активности — влияние частиц наиболее сильное; максимум солнечной активности — наиболее слабое	Уровень ионизации, параметры орбиты	LEO, GEO, NEO, межпланетные орбиты
Протоны солнечных вспышек	KING; JPL92	Влияние частиц проявляется только во время максимума солнечной активности	Расстояние от Солнца; параметры орбиты; местоположение вспышки на Солнце	LEO (>45°), GEO, NEO, межпланетные орбиты
Тяжёлые ионы, вызванные солнечными вспышками	CREME; JPL92; CHIME	Влияние частиц проявляется только во время максимума солнечной активности	Расстояние от Солнца; параметры орбиты; местоположение вспышки на Солнце	LEO, GEO, NEO, межпланетные орбиты

Таблица 4

Дозы, поглощённые в результате воздействия электронов и протонов, для низкой орбиты 600x800 км

Угол наклоения орбиты	Толщина экрана КА, выполненного из алюминия, ковара, стали (материал корпуса преобразователя), мм	Поглощённая в течение года доза, рад (Si)			Суммарная поглощённая доза, рад (Si)	
		от воздействия электронов	от воздействия захваченных протонов	от воздействия протонов СКЛ	за 1 год	за 7 лет
27°	0, 0,4, 0,25	860	973	—	1833	12831
27°	1,25, 0,4, 0,25	356	828	—	1184	8288
27°	6,25, 0,4, 0,25	25,9	679	—	704,9	4934
60°	0, 0,4, 0,25	3690	653	—	4343	30401
60°	1,25, 0,4, 0,25	1240	519	—	1759	12313
60°	6,25, 0,4, 0,25	78,8	403	—	481	3373

Таблица 5

Дозы, поглощённые в результате воздействия электронов и протонов, для высокой орбиты 20 000x20 000 км

Угол наклоения орбиты	Толщина экрана КА, выполненного из алюминия, ковара, стали (материал корпуса преобразователя), мм	Поглощённая в течение года доза, рад (Si)			Суммарная поглощённая доза, рад (Si)	
		от воздействия электронов	от воздействия захваченных протонов	от воздействия протонов СКЛ	за 1 год	за 7 лет
27°	0, 0,4, 0,25	181000	—	768	1810768	12675376
27°	1,25, 0,4, 0,25	501000	—	819	501819	3512733
27°	6,25, 0,4, 0,25	5560	—	836	6396	44772
60°	0, 0,4, 0,25	24100	—	74900	99000	693000
60°	1,25, 0,4, 0,25	7750	—	48500	562250	393750
60°	6,25, 0,4, 0,25	2580	—	24400	26980	188860

Physitron Inc. расчётные данные о суммарной поглощённой дозе на разных орбитах для DC/DC-преобразователей фирмы Interpoint. При расчёте предполагалось применение в защитном экране трёх материалов: алюминия, ковара и стали. Сталь является материалом корпуса преобразователя. Толщина экрана из

ковара для всех вычислений принята постоянной величиной 0,38 мм, а толщина алюминия варьировалась от 0 до 6,35 мм.

Влияние параметров защитного экрана на размеры поглощённой дозы показано в этих таблицах не случайно, так как экранирование остаётся наиболее действенным способом защиты на разных ор-

битах. Чтобы проиллюстрировать это ещё раз, приведём следующий пример: за 10 лет полёта во внешнем поясе (захваченные электроны с энергиями около 7 МэВ) суммарная доза может принимать значения от более чем 1 Мрад (Si) при экране с эффективной толщиной 1 г/см² (алюминий толщиной около 3,7 мм) до менее чем 10 крад (Si) при увеличении эффективной толщины экрана до 3 г/см².

Низкие орбиты

КА на низких орбитах (Low Earth Orbits – LEO) проходят несколько раз в день через частицы, захваченные поясами Ван Аллена. Уровень интенсивности потоков частиц, наблюдаемый во время этих прохождений, в значительной степени зависит от наклоения и высоты орбиты. Локализация максимума потоков зависит от энергии частиц. Так, для протонов с энергиями $E > 10$ МэВ пик потока частиц находится на высоте около 3000 км. В условиях нормальной геомагнитной и солнечной активности уровни интенсивности потоков протонов быстро понижаются на высотах более 3000 км. Тем не менее после сильных геомагнитных бурь и солнечных вспышек высокоэнергетичные протоны были обнаружены и на высотах более 3000 км.

Интенсивность потоков частиц ГКЛ и СКЛ зависит от наклоения и в меньшей степени от высоты орбиты. При увеличении радиуса орбиты облучение частицами ГКЛ и СКЛ постепенно усиливается. Однако влияние, которое оказывается этими частицами на оборудование КА, гораздо более выражено зависит от наклоения орбиты. Всё это связано с защитным действием магнитного поля Земли и его формой, которая такова, что с приближением к полярным зонам действие поля ослабевает. В результате по мере увеличения угла наклоения вплоть до углов полярных орбит КА всё больше времени проводит в зонах, достижимых частицами ГКЛ и СКЛ. С другой стороны, при нормальных магнитных условиях аппараты с углами наклоения орбит меньше 45° будут практически полностью защищены от этих частиц. Во время значительных солнечных вспышек или магнитных бурь наблюдаются искажения геомагнитного поля, что приводит к проникновению частиц СКЛ и ГКЛ в области, не доступные им в нормальных условиях. Например, в течение 10-летнего полёта по полярной орбите (угол наклоения 90°) с высотой 800 км полупроводниковая электронная аппаратура, за-

Таблица 6

Дозы, поглощённые в результате воздействия электронов и протонов, для геостационарной орбиты 10 000×10 000 км

Угол наклона орбиты	Толщина экрана КА, выполненного из алюминия, кобальта, стали (материал корпуса преобразователя), мм	Поглощённая в течение года доза, рад (Si)			Суммарная поглощённая доза, рад (Si)	
		от воздействия электронов	от воздействия захваченных протонов	от воздействия протонов СКЛ	за 1 год	за 7 лет
27°	0, 0,4, 0,25	100000	521	38400	138921	972447
27°	1,25, 0,4, 0,25	29200	118	21500	50818	355726
27°	6,25, 0,4, 0,25	330	6,84	10900	11236,8	78658
60°	0, 0,4, 0,25	24100	365	45300	60765	488355
60°	1,25, 0,4, 0,25	7750	83,9	24700	32534	227737
60°	6,25, 0,4, 0,25	94,6	5,07	12100	12200	85398

щищённая 2,5-миллиметровым алюминиевым экраном, накопит суммарную дозу около 30 крад (Si). Но увеличение высоты орбиты только на 300 км приведёт к более чем трёхкратному росту накопленной дозы – до 100 крад (Si). На высоте 2000 км накопленная доза увеличится уже до 500 крад (Si).

Интересны расчёты для аппарата JASON, высота орбиты которого 1338 км, угол наклона 98°. Ионизирующее излучение было представлено практически только высокоэнергетичными протонами (низкоэнергетичные частицы и электроны экранируются материалом корпуса

КА). Объектом исследования являлись DC/DC-преобразователи, применяемые в составе бортового устройства ориентации по звёздам. Расчёты выполнялись с использованием подробной модели пространственного распределения массы устройства и показали, что ожидаемый худший показатель суммарной дозы за время полёта КА составляет 12,7 крад (Si). Правда, эти расчёты не учитывали некоторые дополнительные факторы, такие, например, как коэффициент запаса. Примечательно, что спектр протонного излучения для аппарата JASON имеет более высокое значение энергии по сравнению

с КА, которые функционируют на более низких орбитах (номинально 120 МэВ).

Несмотря на то что значение допустимой накопленной дозы 20–30 крад (Si) является низким для большинства космических применений, системы низкоорбитальных КА с высотой орбиты менее 850 км смогут сохранять работоспособность в течение 8–10 лет с небольшой деградацией или даже без неё, используя отобранные коммерческие компоненты с таким допустимым значением суммарной дозы. Дополнительное экранирование коммерческих компонентов обеспечивает уменьшение вероятности сбоев. Увеличение затрат в этом случае связано только с дополнительным тестированием партий изделий и определением их радиационной стойкости.

Высокоэллиптические орбиты

Высокоэллиптические орбиты тоже проходят через пояса Ван Аллена. Помимо этого, вследствие большой высоты они независимо от их наклона открыты для длительного облучения космическими лучами и потоками частиц от солнечных вспышек. Уровень воздействия со стороны захваченных протонов, которые встречаются на высокоэллипти-

ческих орбитах, зависит от положения перигея орбиты (высоты, широты и долготы). В том случае когда положение перигея смещается за время протекания полёта, параметры отклонения должны быть приняты во внимание при прогнозировании влияния протонов. На высокоэллиптических орбитах КА также получает большие дозы облучения, обусловленные захваченными протонами и электронами на внешних поясах, где аппарат находится значительное время при прохождении каждого апогея.

Геостационарные орбиты

На геостационарных орбитах (ГЕО) проявляется влияние захваченных протонов, которые, хоть и характеризуются относительно низким уровнем энергии, могут стать причиной SEE, и это надо учитывать. Кроме того, ГЕО почти полностью открыты для действия частиц СКЛ и ГКЛ. Протоны с энергиями ниже 40-50 МэВ обычно ослабляются магнитным полем Земли, однако это ослабление становится менее выраженным во время солнечной активности и магнитных бурь. Во время этих явлений силовые линии поля Земли, которые при нормальных условиях находятся на высоте порядка 7 радиусов пла-

неты, могут быть сжаты до высоты примерно 4 радиусов, и частицы получают доступ к значительно более близким к Земле областям. К тому же КА на ГЕО постоянно подвергаются облучению захваченными электронами. В результате суммарная доза, накопленная на орбите ГЕО, может стать ощутимой для аппаратуры КА со слабым экранированием.

Межпланетные орбиты

Оценка радиационной обстановки для этих межпланетных полётов может быть чрезвычайно сложной, зависящей от количества прохождений траектории через радиационные пояса земли, изменяющегося расстояния до Солнца, точности данных о радиационной обстановке вблизи других планет и т.д. Каждый из факторов должен быть надлежащим образом учтён для выработки точной траектории полёта.

Особо тщательной подготовки требуют полёты, которые выполняются в условиях максимальной солнечной активности и имеют траектории, проходящие вблизи Солнца. В подобных случаях рекомендуется пересчитывать интенсивности частиц солнечного происхождения с использованием специальных коэффици-

ентов, определяемых в зависимости от расстояния между КА и Солнцем.

Опыт показывает, что при прогнозировании возможных последствий воздействия космических частиц эффективной мерой снижения неопределённости, которая может привести к недостаточным или избыточным мерам по обеспечению надёжности, является получение ответов на следующие вопросы:

1. Когда состоится старт?
2. Где будет проходить полёт?
3. Когда система будет развёрнута (выйдет на основной режим функционирования)?
4. Что система должна делать в наихудших условиях окружающей среды?
5. Что в системе является критичным для успешного прохождения полёта?

Какова степень экранирования SEE-чувствительных деталей?

Расчёты, учитывающие только наихудшие условия, ведут к проектированию с большим запасом прочности и должны применяться только на стадии эскизных работ, когда реальная дата старта и продолжительность полёта ещё не определены. После определения даты старта и продолжительности полёта можно оценить, как долго КА будет в каждой фазе

солнечного цикла. Эти расчёты должны принимать во внимание последствия задержки старта на один год. При формулировании сценария миссии особенно важно исключить ситуации выполнения заданий специально не защищённым оборудованием в условиях максимума солнечной активности.

Последствия радиационных воздействий и основные способы защиты

Влияния ионизирующих излучений на электронное оборудование КА можно разделить на два вида: суммарная накопленная доза и воздействия единичных событий. Два явления различаются как по условиям возникновения, так и по способам ослабления.

Суммарная накопленная (поглощённая) доза приводит к постепенной деградации электронной техники вследствие явлений, связанных с получением и накоплением дополнительной энергии. Накопленная доза проявляется через параметрические и функциональные отказы или изменения параметров устройства, таких как токи утечки, значения порогового напряжения и т.д. В космическом пространстве главными источниками облучения, вызывающими накопление дозы, являются захваченные протоны и электроны, а также протоны СКЛ.

SEE происходит в случае, когда одиночный ион поражает материал, вызывая выделение значительной энергии в устройстве. Воздействия SEE могут быть разделены на два основных класса: случайные и устойчивые.

Случайные сбои, как правило, сопряжены с кратковременным импульсом или изменением бита в устройстве, эти сбои вызывают отклонения в работе устройства, обнаруживаемые на его выходе. В силу этого случайные сбои полностью определяются спецификой устройства и легко группируются по характеру влияния на работу устройства. К подобным отклонениям относятся, например, единичные «мягкие» (некатастрофические, неразрушительные) отказы типа SEU. В логической схеме или аналого-цифровом преобразователе всплеск или пик на выходе устройства может быть потенциальным SEU, изменение бита в ячейке памяти или регистре тоже обычно является следствием SEU. Такие же единичные отказы, происходящие в схемах управления, могут вызывать и другие эффекты. Во время прерывания функционирования (Single Event Functional Interrupt – SEFI), вызванного единич-

ным отказом, устройство приостанавливает нормальное функционирование, и его состояние зависит от типа конкретного устройства. Например, схемы управления обычно переходят в режим тестирования, в режим останова или в неопределённое состояние. В общем случае единичные отказы устраняются перезапуском устройства или перезаписью данных.

Устойчивые отказы сопряжены с постоянными отклонениями в функционировании устройства и могут привести даже к его физическому разрушению. Примером подобного отказа может быть «зависание» бита в устройстве памяти. Потенциально разрушительным может быть состояние, вызванное событием SEL, так как влечёт появление тока, превышающего максимально допустимое для устройства значение; если в этом состоянии не отключить питание, устройство в конечном счёте будет разрушено. Разрушительные последствия могут иметь и такие воздействия, как SEB, вызывающее выгорание стока-истока силового MOSFET, и SEGR, способное привести к выгоранию изолятора затвора силового MOSFET.

Чувствительность устройства к SEE оценивается на основе пороговых значений LET, о чём рассказывалось ранее, и величины эффективного сечения (S), соответствующей той части площади сечения устройства, которая подвергается воздействию потока частиц и чувствительна к этому воздействию. Для конкретных значений LET эффективное сечение (профиль) вычисляется по формуле:

$$S = (\text{количество единичных сбоев}) / (\text{поток частиц}).$$

Единицами измерения эффективного сечения являются см² на устройство или на бит. По его значению оценивается чувствительный объём – объём той части устройства, которая находится под влиянием излучения, вызывающего SEE. Чувствительный объём, как правило, значительно меньше общего реального объёма устройства.

Параметрический и функциональный отказы устройства являются основными видами отказов, связанных с накоплением дозы радиации. Накопление дозы до предельного значения требует определённого времени, которое соответствует среднему времени до отказа (МТТФ). Что же касается SEE, то такого рода события происходят случайно, и даже на начальной стадии САС КА при невысокой накопленной дозе и ещё большом потенциальном ресурсе такие еди-

ничные воздействия способны привести к устойчивому отказу бортовых устройств. Эффективными средствами ослабления влияния внешней радиации являются использование устройств, устойчивых к накопленной дозе радиации (устройств, отобранных с применением радиационно-термической обработки), местное экранирование устройств, экранирование блоков, оптимизация размещения электронных блоков внутри КА по критериям минимизации потоков излучения, плотности монтажа аппаратуры и т.д. Подробно методы повышения надёжности функционирования электронной аппаратуры при эксплуатации в условиях космического пространства описаны в [22-25].

Примечательно, что «горячее» резервирование устройств не является эффективным способом ослабления влияния фактора накопленной дозы, так как резервные устройства также будут деградировать. С другой стороны, последствия необратимых деструктивных явлений, вызванных SEE (пробой затворов, выгорание каналов и т.д.), могут быть устранены только переключением на резервированные устройства. И здесь очень важно, что сервисные функции DC/DC-преобразователей фирмы Integpoint позволяют организовывать резервированные системы электропитания бортовой аппаратуры. При двухканальном построении системы электропитания один канал является рабочим, а второй находится в «холодном» резерве. В этом случае источники питания выполняются автономными для каждого канала, а переключение каналов осуществляется специальным автоматом. Для питания такого автомата нужен отдельный маломощный источник, обычно трёхканальный. Возможность параллельной работы DC/DC-преобразователей фирмы Integpoint (с выходными мощностями от 65 Вт и выше) позволяет повышать надёжность аппаратуры, используя принципы резервирования отдельных модулей питания.

Вместо заключения: извечный поиск компромисса...

В настоящее время в нашей стране и за рубежом множество спутников готовится к выводу на низкие круговые орбиты 700...1500 км. Эта зона чрезвычайно привлекательна для систем связи, обслуживающих спутниковые телефоны, портативные компьютеры и т.п. Однако разработчики КА сталкиваются здесь с рядом непростых задач. Вспомним, что

низкие круговые орбиты характеризуются воздействиями со стороны протонов и электронов и отличаются чрезвычайным непостоянством условий. Например, на высоте около 700 км возможно применение компонентов со значениями предельной накопленной дозы 30 крад (Si), так что отобранные коммерческие электронные компоненты могут быть использованы в соответствующих проектах. Однако уже на высотах более 900 км такие компоненты, даже будучи защищёны экранами, могут стать непригодными из-за значительно увеличивающейся плотности потока захваченных протонов. На низких орбитах с высотами от 100 до 6000 км суммарная доза, накапливаемая ИМС за время 10-летнего полёта, лежит в диапазоне от 50 до 2000 крад (Si) — слишком широкий диапазон для выработки единого решения и слишком высокая верхняя граница для применения отобранных коммерческих компонентов без специальной защиты. Использование защитных экранов существенно снижает вероятность отказов нерадиационно-стойких компонентов, вызванных накопленной дозой, однако такое решение тоже может оказаться непригодным, но уже по другой причине: вес дополнительного экрана может стать в действительности настолько большим, что стоимость запуска превысит 1000 долларов США на одну ИМС [26].

Какие же альтернативы остаются для спутниковых систем, планируемых для орбит с высотами от 1000 и 1500 км? Конечно же, радиационно-стойкие специализированные компоненты с гарантированной работоспособностью при ПНД до 1 Мрад (Si) способны достаточно длительное время функционировать на таких орбитах, но для коммерческих спутников их стоимость может оказаться непомерно высокой. Если это так и требуются относительно недорогие решения, в принципе, они могут быть найдены на базе описанных в статье подходов к испытанию, отбору, защите, резервированию, выбору режимов функционирования и т.д. Каждое из таких решений будет своеобразным компромиссом, при выработке которого крайне важно правильно расставить приоритеты, сообразуясь с целями и задачами проекта.

В конечном счёте, наблюдаемый сейчас в мире процесс роста и расширения космического бизнеса непременно должен подтолкнуть рынок радиационно-стойких компонентов к передовым и недорогим решениям, направленным на

повышение надёжности устройств бортовой аппаратуры КА. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Кадель В.М. Проектирование систем и устройств вторичного электропитания радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1990.
2. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике/Ю.И. Конев, Г.Н. Гулякович, К.П. Полянин и др.; Под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1987.
3. Ермошин В.М., Конев Ю.И., Соловьев И.Н. Системы электрооборудования автономных объектов. Устройства и системы энергетической электроники// Тезисы докладов научно-технической конференции УСЭЭ-2000. — М.: НТФ ЭНЭЛ, 2000.
4. Исаев В.М. Тенденции развития источников вторичного электропитания специального назначения. Устройства и системы энергетической электроники// Тезисы докладов научно-технической конференции УСЭЭ-2000. — М.: НТФ ЭНЭЛ, 2000.
5. Жданкин В.К. Радиационно-стойкие преобразователи напряжения для бортовой аппаратуры космических аппаратов// Электронные компоненты. — 2004. — № 12.
6. Жданкин В.К. Вторичные источники электропитания фирмы Interpoint// Современные технологии автоматизации. — 1997. — № 4.
7. Жданкин В.К. Перспективные изделия энергетической электроники фирмы Interpoint// Электрическое питание. — 2004. — № 3.
8. Gamma Total Dose Radiation Performance of Isolink Optocouplers. Application Note 1003. — Isolink.
9. Robert Reed, Kenneth LaBel, Hak Kim, Henning Leidecker, Jim Lohr. Test Report of Proton and Neutron Exposures of Devices that Utilize Optical Components and Contained in the CIRS Instrument. — Greenbelt, (Maryland) NASA/Goddard Space Flight Center. — № 20771.
10. Robert Reed, Stephen Buchner. Guideline for Ground Radiation Testing and Using Optocouplers in the Space Radiation Environment. — NASA/Goddard Space Flight Center, 2002, March 28.
11. Jay A. Kuehny. Interpoint Converter Radiation Issues: Proton Displacement Damage. — Interpoint, November 20, 1997.
12. Kenneth A. LaBel, Richard K. Barry, Karen Castell, Hak S. Kim, Christina M. Seidleck. Implications of Single Event Effect Characterization of Hybrid DC-DC Converters and a Solid State Power Controller. — NASA/GSFC, Hughes/ST Systems Corp., 1994.

13. Radiation Report on SMEX Common Buy Part No. MTO2815T/ES. — NASA/GSFC, July 1, 1991. PPM-91-438
14. Radiation Reports on HST/PCP Part No. MFL2805S/MFL2812S/MFL2815S. — NASA/GSFC, February 1995.
15. Keneth A. LaBel, Christina Seidleck. Single Event Effect Test Report for GSFC Test Trip to BNL. Version 1.0. — NASA/GSFC, November 9-12, 1994.
16. Sahu K. Radiation report on MHF2812D and MHF2805S. — NASA/GSFC, April 8, 1996. PPM-96-004.
17. Попов В.Д. Пострадиационный эффект в ИС. Неразрушающий контроль качества ИС// Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2002. — № 4. — С. 36-39.
18. Sahu K. Radiation Report on MHV2803R3. — NASA/GSFC, August 27, 1997. PPM-97-037
19. Sahu K., Kniffin S. Radiation Report on MTR2805SF (Interpoint), (LDC9828). — NASA/GSFC. PPM-98-030.
20. Sahu K., Kniffin S. Radiation Report on MTR2815SF (Interpoint) (LDC9830). — NASA/GSFC. PPM-98-031.
21. MIL-STD-883F Test Method Standard Microcircuits. — USA: Department of Defense, 18 June 2004.
22. Гобчанский О., Попов В., Николаев Ю. Повышение радиационной стойкости промышленных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры// Современные технологии автоматизации. — 2001. — № 4.
23. Keneth A. LaBel, Michele M. Gates, Amy K. Moran, Paul W. Marshall, Janet Barth, E.G. Stassinopoulos, Christina M. Seidleck, Cheryl J. Dale. Commercial Microelectronics Technologies for Applications in the Satellite Radiation Environment. — NASA/GSFC, 1992.
24. Глянченко А., Архангельский А. Применение модуля MicroPC в аппаратуре ABC-Ф на борту спутника «КОРОНАС-Ф»// Современные технологии автоматизации. — 2004. — № 3.
25. Фатеев В., Лебедев Д., Фарафонов А., Гришин Ф. Применение средств промышленной автоматизации в бортовой аппаратуре малых космических аппаратов// Современные технологии автоматизации. — 2004. — № 3.
26. Joseph M. Benedetto. Economy-Class Ion-Defying ICs in Orbit// IEEE Spectrum. — 1998 March. — Volume 35. — No 3.

**В.К. Жданкин —
сотрудник фирмы ПРОСОФТ
119313 Москва, а/я 81
Телефон: (095) 234-0636
Факс: (095) 234-0640
E-mail: victor@prosoft.ru**