

Гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи с предельным уровнем радиационной стойкости для космической отрасли.

Часть 2

Окончание. Начало см. в предыдущем номере журнала.

В статье рассматриваются радиационно-стойкие гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи напряжения с мощностями до 120 Вт для работы в бортовых электросистемах постоянного напряжения 100 В космических аппаратов (КА). Модули характеризуются расширенным функционалом, позволяющим исключить использование внешних элементов и микросхем для организации служебных функций, что сказывается на массогабаритных характеристиках бортовой аппаратуры. Особое внимание уделяется требованиям к радиационной стойкости и контролю качества при производстве этих модулей. Модули изготавливаются предприятием, входящим в Китайскую корпорацию электронных технологий CETC (China Electronics Technology Group Corp.).

Виктор ЖДАНКИН,
инженер,
viktor@prochip.ru

Защитные и сервисные функции

Для безопасной эксплуатации в жестких условиях космического пространства модули содержат набор защитных и сервисных функций, которые расширяют возможности их применения.

Схема блокировки при пониженном напряжении на входе включает преобразователь, когда входное напряжение падает ниже порогового уровня блокировки защиты от пониженного напряжения. Типичное низкое пороговое напряжение блокировки защиты от пониженного напряжения V_{OL} (выкл.) составляет приблизительно 56,8 В, а типичное высокое пороговое напряжение блокировки защиты от пониженного напряжения V_{OH} (вкл.) – примерно 57,9 В.

При перегрузке по току или коротком замыкании на выходе встроенная схема защиты ограничивает ток. После устранения причины неисправности устройство возобновляет нормальную работу.

В схеме защиты преобразователя от чрезмерной нагрузки по току не применяются элементы, переходящие в режим защелкивания, что устраняет возможность ложного срабатывания схемы защиты в случае воздействия протонов или ионов.

Внутреннее энергопотребление устройств в режиме короткого замыкания при нормальной температуре и номинальном входном напряжении представлены в табл. 6.

Испытание на время поддержания выходного напряжения при КЗ было проведено при комнатной температуре и нормальных атмосферных условиях. Входное напряжение составляло 100 В, значение ограничения тока первичного источника питания было установлено на высокий ток нагрузки, а выходная нагрузка находилась в режиме

КЗ. Начальное время поддержания короткого замыкания равнялось 60 с; при этом последующие значения этого параметра увеличивались на 60 с. После каждого режима короткого замыкания проводился контроль по электрическим параметрам – выходное напряжение устройства оставалось нормальным. После увеличения времени режима КЗ до 300 с было применено короткое замыкание в течение 2 ч. После устранения короткого замыкания и включения питания выходное напряжение устройства соответствовало указанным техническим характеристикам. Устройство выдержало испытание на предельное время поддержания КЗ.

Функция дистанционного управления включением и выключением внешним сигналом со стороны входа и выхода позволяет включать и выключать модуль без циклической коммутации входной мощнос-

Таблица 6. Внутреннее энергопотребление преобразователей напряжения в режиме короткого замыкания

Название модели	Внутреннее энергопотребление при коротком замыкании и входном напряжении 100 В
HD/CD/100W-5-100U/SP	40 Вт
HD/CD/100W-12-120U/SP	25 Вт
HD/CD/100W-15-120U/SP	25 Вт
HD/CD/100W-12-110U/D1	28 Вт
HD/CD/100W-28-120U/SP	22 Вт

Примечание. Приведенные выше параметры были получены путем измерения у основания выходного контакта устройства при комнатной температуре.

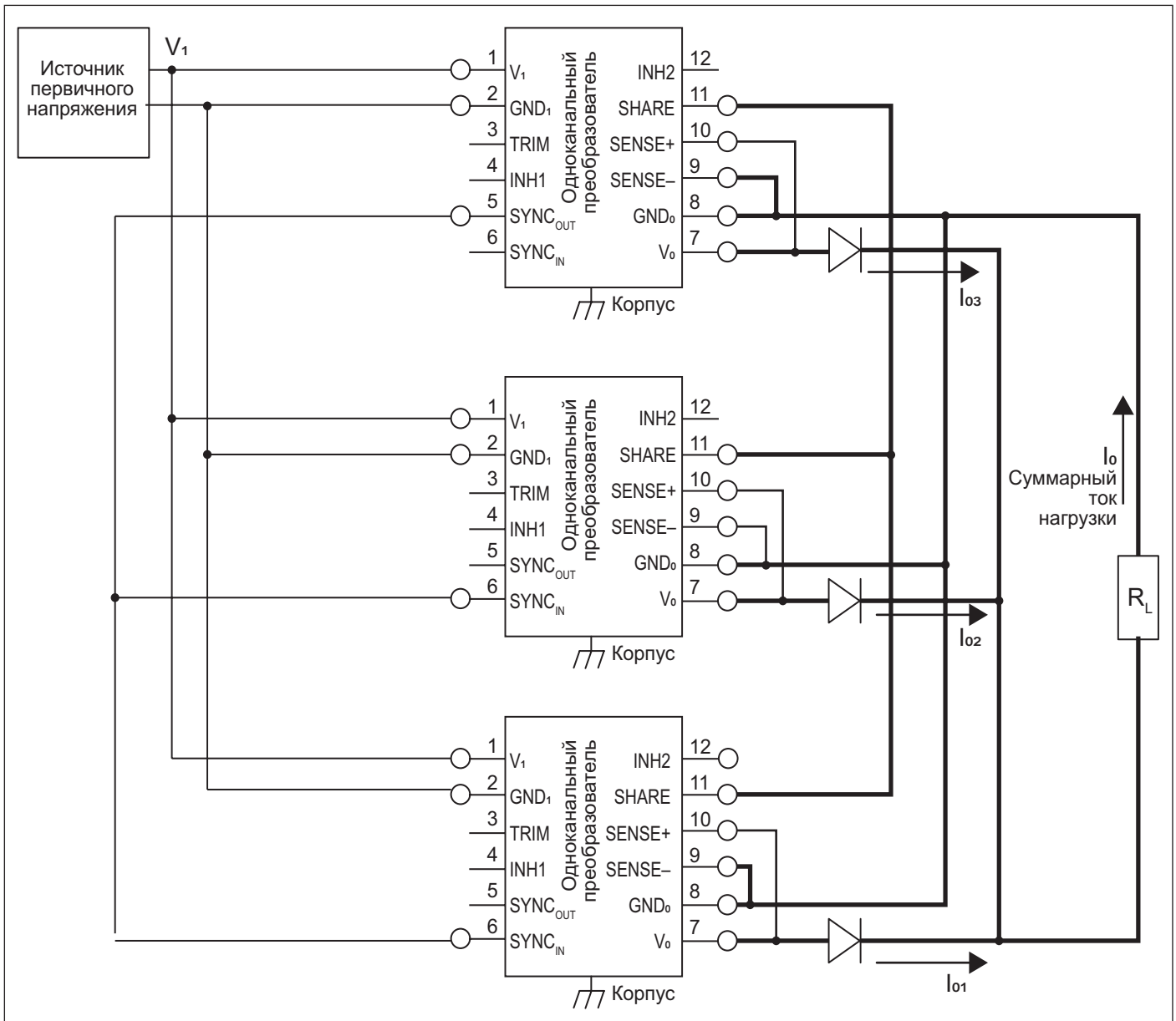


Рис. 6. Схема параллельного соединения одноканальных модулей

ти. Эта функция востребована в таких применениях, как удержание модуля в выключенном состоянии для сохранения энергии в течение времени, когда не требуется выходное напряжение; уменьшение пускового тока; реализация определенного алгоритма подачи питания к отдельным функциональным узлам аппаратуры; задержка включения преобразователя до тех пор, пока его входное напряжение не станет стабильным. При параллельном соединении нескольких устройств (до пяти) эта функция обеспечивает последовательное включение в момент подачи входного напряжения, одновременно снижая пусковой ток.

При построении систем электропитания для увеличения выходной мощности имеется возможность параллельного соединения нескольких модулей с выравниваем выходных токов (вход SHARE). В этом режиме для обеспечения работы соединенных параллельно модулей в режиме синхронизации частоты может использоваться внешний синхросигнал или взаимная синхронизация нескольких модулей. Этот режим позволяет исключить низкочастотные составляющие разностной частоты и увеличенной амплитуды, а также уменьшить пульсации потребляемого тока. Коэффициент заполнения внешнего импульсного синхросигнала должен быть 40–60%.

При использовании функции выравнивания выходных токов при параллельном соединении нагрузка должна быть не менее 10% от номинального значения. При недостаточной нагрузке параллельное распределение тока может привести к повышенному выходному напряжению. К выходу каждого модуля рекомендуется последовательно подключать диод Шоттки. Выбор диода следует определять в соответствии с фактическими условиями эксплуатации – номинальный прямой ток через диод должен быть выше максимального выходного тока модуля. Блокирующие диоды (по схеме «ИЛИ») повышают надежность параллельного соединения – в случае отказа одного модуля другие продолжают работать без понижения выходного напряжения. Схема параллельного соединения одноканальных модулей с помощью функции равномерного распределения тока и внешнего синхросигнала приведена на рис. 6.

Эффективность распределения тока при параллельном включении четырех устройств была проверена при разных нагрузках в течение 168 ч при нормальной температуре и входном напряжении 100 В. Коэффициент распределения тока нагрузки находился в пределах 6%. Результаты испытаний представлены в технической документации на модуль.

Одноканальные модули оснащены схемой компенсации падения напряжения на проводниках, соединяющих выход преобразователя с расположенной на значительном удалении нагрузкой. При использовании функции внешней обратной связи напряжение на выходном выводе модуля не должно превышать 1,1 номинального выходного напряжения. Если требуется подстройка выходного напряжения у модулей без специализированного вывода (HDCD/100W-5-100U/SP, HDCD/100W-12-120U/SP и HDCD/100W-15-120U/SP) для подключения регулировочного резистора рекомендуется подключать резистор R_{ADJ} между выводом SENSE+ и GND_O (вывод SENSE- подключается к GND). Напряжение можно увеличить на 10% относительно номинального значения.

Функция точной настройки выходного напряжения у модулей HDCD/100W-28-120U/SP, HDCD/100W-12-110U/D1 и HDCD/100W-5-100U/D1 позволяет получить нестандартные значения напряжений в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения подключением резистора между специальным выводом TRIM и общим проводом или выводом выходного напряжения в зависимости от направления регулировки.

Наличие в преобразователях комплекта схем защит и сервисных функций исключает необходимость в разработке дополнительных схем и применении дополнительных обвязывающих элементов, что сказывается на массогабаритных характеристиках бортовой аппаратуры.

Модули преобразователей напряжения имеют на входе и выходе встроенные LC-фильтры, которые обеспечивают подавление помех до уровней, приемлемых для многих применений.

Для обеспечения более высоких требований по помехам рекомендуется подключить на вход преобразователя помехоподавляющий фильтр HFE/100-461-1000. Фильтр разработан с учетом изменения входного импеданса DC/DC-преобразователей серии HDCD/100W во всем диапазоне изменений входного напряжения – входной импеданс преобразователя должен быть немного выше выходного импеданса фильтра, что исключает возникновение автоколебательного режима в системе «входной фильтр – преобразователь».

Модуль фильтрации подавляет высокочастотные помехи генерируемые импульсным преобразователем напряжения на проводах, по которым оборудование получает мощность от первичного источника питания. Результаты измерений кондуктивных помех в полосе частот 30 кГц...10 МГц на проводах при использовании некоторых модулей с полной нагрузкой и установленным фильтром HFE100-461-1000 показаны на рис. 7. Тест CE102 по стандарту GJB151A-97 (аналогичен американскому стандарту MIL-STD-461E/F) регламен-

тирует допустимые уровни искажения напряжения на шинах питания всего комплекта оборудования. Пределы, указанные в категории CE102, соответствуют именно уровням напряжения и установлены в дБмкВ.

При включении питания неизбежен большой пусковой ток более высокий, чем номинальное значение, в течение очень короткого промежутка времени. Потребление более высокого тока в момент включения обусловлено зарядом входных конденсаторов, подключенных ко входу шины питания. Для ограничения пускового тока предлагается применять хорошо известные активные схемы плавного запуска, которые выполняются на транзисторах P- или N-типа [8]. Рабочее напряжение P- и N-канальных MOSFET должно быть больше 200 В, а ток должен определяться на основе тока шины и учитываться при проектировании совместно с понижением номинальной мощности. Время нарастания входного напряжения DC/DC-преобразователя должно превышать 1 мс.

Однако обычно ограничители пускового тока включаются на входе системы электропитания, ограничивая зарядный ток конденсаторов входных фильтров всей группы модулей электропитания. Таким образом обеспечивается защита первичного источника питания системы электропитания КА (аккумуляторная батарея), которая имеет ограниченные энергоресурсы и не допускает бросков потребляемого тока. Структуры таких ограничителей пускового тока подробно рассмотрены в работе [9].

Для уменьшения входных перенапряжений, которые возникают при включении источника питания, рекомендуется установка на входе модулей электролитического конденсатора с относительно высоким эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR). Емкость сглаживает импульсы перенапряжения, а ESR, работая как демпфирующий резистор, помогает ослабить колебательный процесс, понижая добротность паразитного колебательного контура во входной цепи [8].

Для снижения уровня шумов преобразования или пульсации на выходе DC/DC-преобразователей установлен внутренний LC-фильтр. Если уровень пульсаций выходного напряжения не соответствует требованиям системы, на выходе DC/DC-преобразователя рекомендуется установить фильтр, обеспечивающий подавление остаточных пульсаций до минимума или нежелательных субгармонических колебаний. С этой задачей справится дополнительный конденсатор емкостью 0,1–10 мкФ, LC-фильтр или П-образный фильтр.

Выходной фильтр должен быть создан под требования к пульсациям в установившемся режиме и максимальному диапазону регулирования при изменении нагрузки.

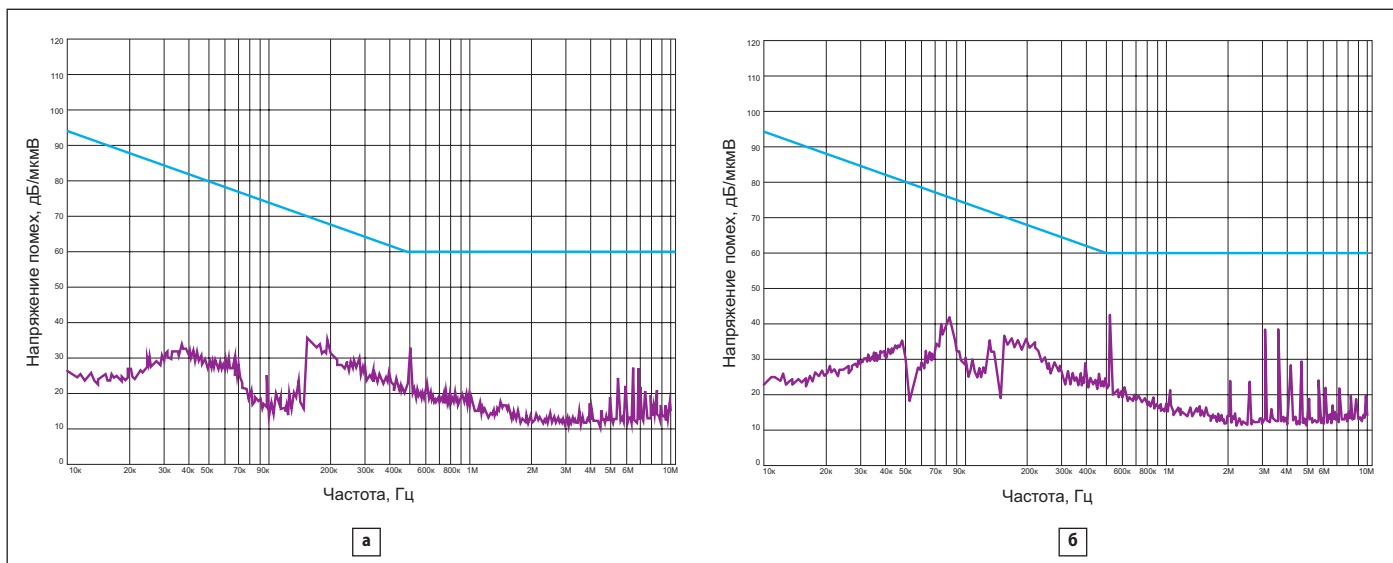


Рис. 7. Графики напряжения помех на соединительных проводах модулей к первичному источнику питания при подключенном фильтре HFE100-461-1000: а) одноканального модуля HDCD/100W-5-100U/SP; б) двухканального модуля HDCD/100W-12-110U/D1

Испытания на долговечность и контроль качества

Для повышения надежности изделий проводились испытания долговечности и нагрузочной способности. Испытания проводились при максимально допустимой температуре корпуса 125°C, номинальном входном напряжении и полной нагрузке. На основании подробных технических условий испытаний на долговечность были выполнены расширенные испытания на срок службы устройств. В дополнение к стандартному квалификационному требованию в 1000 ч были проведены дополнительные испытания в течение 1000 ч.

Результаты испытаний представлены в справочном листке на модули серии HDCD/100W. Представлен также анализ согласованности данных испытаний устройства до начала испытаний на долговечность для партии и анализ согласованности данных испытаний устройства после 1000 и 2000 ч испытаний на долговечность. Показаны изменения выходного напряжения и КПД до и после испытаний на долговечность. Из данных испытаний до и после испытаний на долговечность можно сделать вывод, что результаты испытаний устройства до и после испытаний на долговечность соответствуют требованиям технических характеристик устройств. Технологические процессы изготовления изделий и схемы изделий оптимизированы, что позволяет сделать вывод о высоком качестве продукции.

В процессе производства осуществляются испытания образцов партий изделий в соответствии с требованиями спецификации Q/QJA 20085A-2017 «Общие технические условия для гибридных интегральных схем для космических аппаратов» по методам, сформулированным в стандарте GJB 548C-2021 «Методы и процедуры испытаний микроэлектронных устройств», – контроль подтверждения соответствия (Qualification Conformance Inspection, QCI). Эти стандарты практически совпадают с американскими документами MIL-PRF-38534F, Hybrid Microcircuits, General Specification For и MIL-STD-883H, Test Methods and Procedures For Microelectronics.

Испытания проводятся с целью подтвердить достоверность и гарантировать наивысший уровень качества гибридно-пленоч-

ных изделий. Проводимые испытания с целью выявления потенциально ненадежных изделий позволяют значительно повысить надежность изделий. Общее представление о требованиях QCI дает табл. 7.

Испытания на термоудар проводились методом тестирования, включающим 50 и 100 циклов температурного удара. На каждом этапе выполнялся контроль электрических параметров, проверка герметичности и внешний визуальный осмотр. После 100 циклов температурного удара устройство функционировало нормально, его электрические характеристики соответствовали техническим условиям, а проверка на герметичность и внешний визуальный осмотр были признаны удовлетворительными.

Испытания на механический удар проводились в соответствии с GJB 548C-2021 (метод 2002) с совместным применением методов тестирования, включающих условия C и D. На каждом этапе устройство проходило электрические испытания групп A1 и A4, проверку на герметичность и внешний визуальный осмотр. После испытаний на механический удар в условиях C (максимальное пиковое ускорение 3000g, длительность 0,3 мс) и D (максимальное пиковое ускорение 5000g, длительность 0,3 мс) устройство функционировало нормально, его электрические характеристики соответствовали спецификациям, а проверка на герметичность и внешний визуальный осмотр были признаны удовлетворительными.

В реальных условиях эксплуатации на изделия воздействуют, как правило, не одночастотные синусоидальные колебания, а колебания со сложным спектром частот. Поэтому при проектировании проводится испытание на воздействие широкополосной случайной вибрации. Испытания осуществлялись в соответствии с методом стандарта GJB 548C-2021 с использованием поэтапного подхода (условия D, E, F, G). Каждый этап включал электрические испытания групп A1 и A4, проверку на герметичность и внешний визуальный осмотр. После прохождения испытаний на случайную вибрацию в условиях D, E, F и G устройство функционировало нормально, его электрические характеристики соответствовали спецификациям, а внешний визу-

Таблица 7. Основные этапы контроля подтверждения соответствия техническим условиям Q/QJA 20085A-2017 по разным группам

Группа А	Группа В	Группа С	Группа D
статические испытания при 25°C	физические размеры	внешний вид	относятся к корпусу
статические испытания при максимальной температуре	PIND-контроль (контроль свободно перемещающихся частиц внутри корпуса по уровню шума)	PIND-контроль	термоудар
статические испытания при минимальной температуре	стойкость к растворителям	термоциклирование	стабилизационная печь
динамические испытания при 25°C	осмотр внутренней конструкции/механика	термоциклирование или термоудар	целостность электрических соединений
динамические испытания при максимальной температуре	неразрушающий контроль качества соединений проводников	постоянное ускорение (центрифуга)	герметичность (малые и большие течи)
динамические испытания при минимальной температуре	усилие сдвига кристалла	герметичность (малые и большие течи)	стойкость к соляному туману
функциональный тест при 25 °C	пригодность к пайке	PIND-контроль	изоляция металлического корпуса (ток утечки)
функциональный тест при минимальной и максимальной температурах	герметичность (малые и большие течи)	визуальный контроль	
коммутационные испытания при 25°C	электростатический разряд	окончательный контроль по электрическим параметрам	
коммутационные испытания при максимальной температуре		ресурсные испытания на устойчивость	
коммутационные испытания при минимальной температуре		завершающие электрические испытания	
		содержание водяного пара внутри корпуса	
		визуальный осмотр внутренней конструкции	
		контроль качества соединений проводников	
		испытаний на сдвиг компонентов	

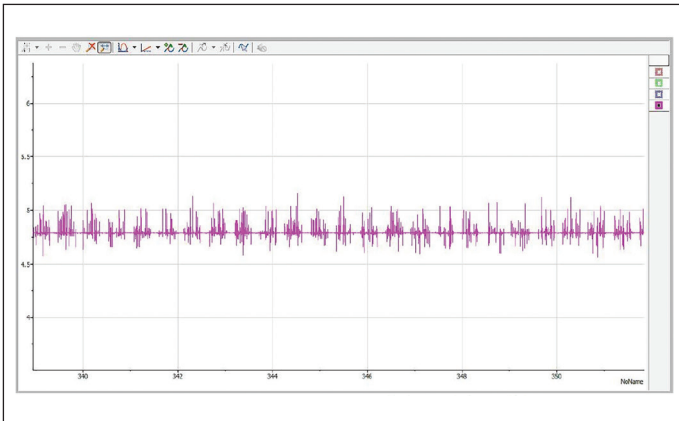


Рис. 8. Форма сигнала на выходе преобразователя HDCCD/100W-5-100U/SP (общая) при облучении ионами тантала

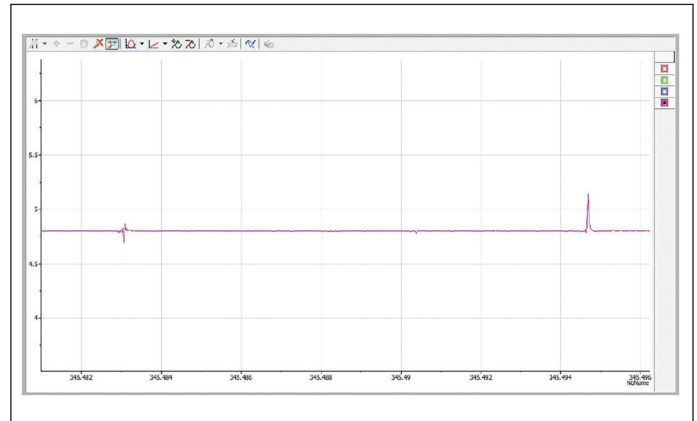


Рис. 9. Форма сигнала на выходе преобразователя HDCCD/100W-5-100U/SP при облучении ионами тантала (в расширенном масштабе)

альный осмотр и проверка на герметичность были удовлетворительными.

Исследования радиационной стойкости

Исследования радиационной стойкости в области дозовых эффектов проводились на гамма-установке, на которой в качестве излучателя используется гамма-излучение изотопного источника ^{60}Co . Испытания проводились при интенсивности 0,01 рад (Si)/с от экспозиционной дозы 0 крад (Si) до 30 крад (Si) и при мощности дозы 0,1 рад (Si)/с от накопленной дозы 30 крад (Si) до 150 крад (Si). Испытания проводились согласно процедурам, изложенным в стандарте QJ10004A-2018 «Метод испытаний на суммарную дозу облучения полупроводниковых приборов аэрокосмического назначения» (документ является аналогом стандарта MIL-STD-883F Method 1019.6).

В процессе испытаний контролировались основные технические параметры модулей: входной ток I_N , выходное напряжение V_O , ток нагрузки I_O , КПД η , пульсации выходного напряжения V_{RIP} , пульсации входного тока I_{RIP} , нестабильность выходного напряжения по напряжению и току, электрическое сопротивление изоляции R_{ISO} , потребляемая мощность в режиме короткого замыкания P_D . Все значения оставались в пределах допусков вплоть до значения суммарной накопленной дозы 150 крад (Si).

Данные по суммарной дозе облучения соответствуют техническим условиям.

Подробно результаты испытаний на стойкость к суммарной дозе изложены в справочной документации на модуль HDCCD/100W-5-100U/SP.

Стойкость к одиночным радиационным эффектам исследовалась на циклотроне в Ланьчжоуском институте современной физики Китайской академии наук с облучением ионами тантала ^{181}Ta с длиной свободного пробега в кремнии 116,6 мкм, полной энергией 2005,5 МэВ и ЛПЭ не менее 75,4 МэВ·см²/мг. Интегральный поток (флюенс) достигал значения 10^7 ионов/см². Испытания на стойкость к одиночным эффектам проводились согласно требованиям стандарта QJ10005A-2018 «Руководство по испытаниям полупроводниковых приборов аэрокосмического назначения на воздействие тяжелых ионов в результате однократного воздействия» (является аналогом ASTM F1192).

Формы сигналов на выходе преобразователя при воздействии ионов тантала показаны на рис. 8–9.

ЛПЭ иона в кремнии – минимальные линейные потери энергии иона, при которых наблюдаются одиночные эффекты, – составляют не менее 75 МэВ·см²/мг (выходное напряжение равно 0, или возникает колебание выходного сигнала). Изменение амплитуды выходного напряжения не превышает $\pm 10\%$ от установившегося значения, а длительность не более 5 мс.

В процессе испытаний в устройстве не наблюдались функциональные сбои (прерывания) (Single Event Functional Interrupt, SEFI) и переходные процессы на выходе в виде импульсов напряжений (Single Event Transient, SET) при значениях ЛПЭ $\geq 75,4$ МэВ·см²/мг.

Используемая в устройствах микросхема ШИМ-контроллера является стандартным изделием со стойкостью к эффекту полной накопленной дозы не менее 100 крад (Si) и стойкостью к одиночным обратимым эффектам не менее 75,4 МэВ·см²/мг. Используемый операционный усилитель является стандартным устройством со стойкостью к эффекту полной накопленной дозы 100 крад (Si). Микросхема быстродействующего компаратора также является стандартным устройством с допустимой суммарной дозой 100 крад (Si). MOSFET-транзисторы и диоды Шоттки, используемые в модулях, характеризуются стойкостью к одиночным эффектам при воздействии частиц с пороговыми ЛПЭ не менее 75,4 МэВ·см²/мг при полной нагрузке. Все перечисленные электронные компоненты подвергались испытаниям на суммарную дозу 100 крад (Si) и испытаниям на воздействие заряженными частицами с ЛПЭ 75,4 МэВ·см²/мг, а также проверку на стойкость к другим воздействующим факторам.

Характеристики радиационной стойкости DC/DC-преобразователей серии HDCCD/100W позволяют применять их в бортовой аппаратуре КА с длительным сроком активного функционирования в условиях воздействия протонов с высокими энергиями; спутниковых системах дистанционного зондирования Земли; на низких и средних круговых орбитах; на орбитах с точками LaGrange L1, L2 и др.

Выводы

Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи серии HDCCD/100W, созданные путем доработки отлично зарекомендовавших себя во многих проектах преобразователей серии AFL120 на базе новейших технологий и современных электронных компонентов, гарантируют высокую стабильность рабочих характеристик, долговременную надежность в жестких условиях эксплуатации, характерных для космического пространства. Наличие широкого комплекта схем защит и сервисных функций исключает необходимость в разработке дополнительных схем и применении большого числа внешних элементов обвязки для реализации требуемых служебных функций, что позволяет упростить проектирование бортовых блоков источников питания КА.

Литература

1. Стив Робертс. Причины и решение проблемы пускового тока: краткое руководство. Силовая электроника. 2021. №2.
2. Миронов А. Структура и алгоритмы работы ограничителей пускового тока для бортовых систем электропитания. Силовая электроника. 2017. №2.