

Модульные радиационно-стойкие гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи мощностью до 600 Вт

Виктор ЖДАНКИН,
инженер,
victor@prochip.ru

В статье рассматриваются высокоэффективные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи повышенной мощности (200–600 Вт), предназначенные для работы в составе систем энергоснабжения космических аппаратов (КА) и спутников. Применение гибридной технологии, эффективных схемотехнических решений и полупроводниковых силовых ключей MOSFET с небольшими потерями мощности, материалов с высокой теплопроводностью обеспечили высокую энергетическую плотность и небольшой вес модулей. Предлагаются модули для работы в бортовых сетях с номинальными напряжениями 28, 42 и 100 В, отвечающие всем основным требованиям, предъявляемым к изделиям космического назначения. Модули выпускаются предприятиями, входящими в Китайскую корпорацию аэрокосмической науки и техники (China Aerospace Science and Technology Corp., CASC) и Китайскую корпорацию электронных технологий (China Electronics Technology Group Corp., CETC).

Источникам вторичного электропитания, входящими в состав систем энергоснабжения КА и занимающих весьма значительную долю объема всей бортовой аппаратуры, предъявляется большое количество жестких требований. Одним из важнейших является высокая энергетическая плотность и небольшой вес источников вторичного электропитания, что продиктовано высокой стоимостью вывода единицы массы полезной нагрузки на орбиту. Кроме того, к источникам вторичного электропитания космического применения предъявляются высокие требования по надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства (ДФ КП) для обеспечения длительных сроков активного функционирования.

Источники питания выполняются в виде элементов не только в составе функциональных узлов бортовой аппаратуры, но и в виде отдельных блоков. Широкое распространение приобрели распределенные системы питания: модули питания малой и средней мощности устанавливаются непосредственно около питаемого узла – процессора, ПЛИС и т.д. Такой метод существенно упрощает разводку силовых цепей в случае использования компонентами нескольких линий питания с разными напряжениями.

Однако для применения в качестве централизованных преобразователей напряжения в системах электропитания бортовой аппаратуры современных КА и спутников требуются модульные DC/DC-преобразователи повышенной мощности с высокой энергетической плотностью, низким профилем, способными разместиться в ограниченном объеме. Государственный заказ на разработку подобных модулей для применения в бортовой аппаратуре специализированных КА на новой платформе для военных применений был размещен на двух предприятиях китайской космической отрасли: в Восточно-китайском научно-исследовательском институте микроэлектроники и Сианьском технологическом институте микроэлектроники (Xi'an Microelectronic Technology Institute, XMTI). Далее в статье представлены модульные DC/DC-преобразователи, разработанные в результате проведенной работы и отвечающие всем основным требованиям, предъявляемым к источникам космического назначения.

Заметим, что продукция этих предприятий китайской космической отрасли также успешно применяется в российских проектах по созданию КА. Российские специалисты отмечают высокое качество и надежность продукции.

Модульные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи повышенной мощности для современных КА специального назначения от Восточно-китайского НИИ микроэлектроники

Для достижения максимальной энергетической плотности конструкции преобразователей при допустимой тепловой напряженности используется гибридная технология на толстых пленках. Достоинства гибридно-пленочной технологии заключаются в сравнительной простоте, способности рассеивать значительные мощности, обеспечении хороших условий отвода тепла от всех теплонагруженных элементов конструкции к поверхности теплоотвода.

В качестве материала подложки используется оксидированный алюминий (Al_2O_3) с содержанием оксида алюминия не менее 99,7%, обеспечивающий качественное изготовление пленочных гибридных микросхем. На керамику наносится металлизационное покрытие с высокой адгезией и стойкостью к термическому циклированию для создания на определенной части подложки-держателя токопроводящего слоя, к которому присоединяются полупроводниковые кристаллы и выводы. Керамика на основе оксида алюминия обла-

даст высокой теплопроводностью и стабильностью электрического сопротивления с повышением температуры. Обратная сторона подложки металлизирована плакированной медью, что позволяет осуществлять припайку платы к металлическому основанию корпуса методом оплавления. Заметим, что алюмооксидная керамика (Al_2O_3) – наиболее стойкая по отношению к радиации разных видов: нейтронной, протонной, рентгеновской и γ -излучения. Электрическая прочность алюмооксидной керамики при облучении нейтронами вплоть до флюенса 10^{20} см^{-2} не изменяется. При облучении гамма- и рентгеновскими лучами существенные изменения в керамике не обнаруживаются. Протонное облучение с энергией 680 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^{14} [1]$ не вызывает заметного ухудшения свойств алюмооксидной керамики.

Толсто пленочные резисторы изготавливаются методом трафаретной печати на керамической подложке с помощью специальной пасты.

Силовые MOSFET, диоды Шоттки и некоторые чип-конденсаторы также устанавливаются на подложку пайкой оплавлением; для монтажа некоторых чип-конденсаторов используется электропроводящая клеевая композиция; электрические соединения кристаллов таких силовых полупроводниковых приборов, как MOSFET и диоды Шоттки выполняются алюминиевой проволокой; электропроводящая клеевая композиция применяется для установки на подложку кристаллов таких «несиловых» полупроводниковых элементов, как диоды, транзисторы и ШИМ-контроллеры, а для их соединения применяется золотая проволока; непроводящий клей используется для монтажа трансформатора к основанию корпуса. Клеящие материалы имеют максимально достижимые эксплуатационные характеристики в части теплопроводности, электропроводности, прочности, стабильности в условиях воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства. Применение склеивания вместо других способов соединения особенно эффективно для снижения массогабаритных характеристик изделий микросборочного производства. В источниках питания ведущих мировых производителей гибридно-пленочных источников электропитания около 90% всех пассивных и активных компонентов смонтированы на керамической плате с помощью клеящих материалов.

Рассредоточение теплонапряженных элементов обеспечивает равномерность выделения тепла по поверхности сборки. Уменьшение теплового сопротивления обеспечивается хорошим тепловым контактом между слоями разнородных материалов (оксидированный алюминий, припой, клей, корпус) и высокой теплопроводностью самих материалов.

Собранная плата устанавливается в металлический корпус. Для герметизации метал-

лического корпуса преобразователей применяется шовно-роликовая сварка. Интеграция системы шовно-роликовой сварки в атмосферные камеры с сухим высококачественным азотом с возможностью контроля параметров влажности и определенного состава атмосферы является актуальной, так как продлевает срок службы и уменьшает вероятность выхода изделия из строя. При герметизации методом шовно-роликовой сварки корпуса не теряют герметичность – показатель герметичности корпусов по скорости утечки гелия не превышает $5 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (малые течи). Во избежание термических напряжений и растрескивания корпуса изготавливаются из материалов, имеющих близкие по значению температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР). Крышки и уплотнительные кольца предварительно плакированы никелем, нанесенным электролитическим методом.

Изоляция между выводами и корпусом осуществляется через слой запресованного припойного стекла.

Выводы модулей выполнены из меди с золотым покрытием толщиной 1,3–5,7 мкм. Корпус, выполненный из холоднокатанной стали, покрыт никелем толщиной 4–15 мкм; выводы расположены горизонтально для объемного монтажа. Внешний вид модуля HD/CD/42-28-430/SP показан на рис. 1.

При создании преобразователей особое внимание уделялось высоте конструкции и выходу мощности. В рассматриваемых приборах используется мостовая топология, трансформаторная развязка в контуре обратной связи, топология управления, обеспечивающая электрическую изоляцию между входными и выходными цепями. Выбранная топология включает в себя мостовой преобразователь на первичной стороне и два дросселя на вторичной стороне, сумма токов в которых равна току нагрузки. Эта топология известна как удвоитель тока. Преимущества преобразователей с удвоителем тока заметно проявляется в мостовой схеме, предназначенной для больших мощностей в нагрузке. Низкий уровень потерь в транзисторах дополняется малыми размерами си-

лового трансформатора и простой конструкцией двух выходных дросселей. Уменьшение размеров индуктивных элементов и емкостных фильтров обеспечивается выбором относительно высоких частот преобразования (200–500 кГц), при которых обеспечиваются минимальные потери в силовых ключах.

Детально схемы подобных мостовых радиационно-стойких преобразователей повышенной мощности рассмотрены в работах [2–3]. Однако эти преобразователи выполнены на многослойной печатной плате, размещаются в корпусе и герметизируются компаундом.

Внешний вид конструкции преобразователя гибридно-пленочного преобразователя (с открытой крышкой) для работы от бортовой сети с напряжением 42 В представлен на рис. 2. В этом модуле, построенном по двухтактной мостовой структуре, в качестве силовых MOSFET выбран радиационно-стойкий N-канальный транзистор с пробивным напряжением $V_{DS} = 100 \text{ В}$, током через открытый канал 33 А, сопротивлением канала в открытом состоянии $R_{DS(ON)} = 44 \text{ мОм}$ и суммарным зарядом затвора $Q_g = 71 \text{ нКл}$. КПД преобразования составляет 90%. Дальнейшее повышение КПД преобразователей можно осуществить заменой кремниевых MOSFET широкозонными нитрид-галлиевыми (GaN) транзисторами с высокой подвижностью электронов, которые обладают намного меньшим зарядом затвора, отличаются высокой скоростью переключения, повышенной рабочей температурой и меньшим напряжением на затворе, что, однако, накладывает повышенные требования к системе управления. В настоящее время многие компании производят специализированные драйверы затворов для управления GaN-транзисторами. В последние годы наблюдается тенденция к использованию GaN-транзисторов в источниках питания космического назначения с целью повышения КПД, уменьшения габаритов, снижения рассеиваемой тепловой мощности и, как следствие, повышения надежности. Примером служит ряд 400-Вт радиационно-стойких DC/DC-преобразователей напряжения се-



Рис. 1. Внешний вид низкопрофильного 430-Вт преобразователя напряжения HD/CD/42-28-430/SP с удельной объемной мощностью 6969 Вт/дм³



Рис. 2. Конструкция низкопрофильного гибридно-пленочного преобразователя напряжения повышенной мощности с явно выраженной плоской формой со снятой крышкой (промежуточный макетный образец)

рии SGRB120, предназначенных для бортовых сетей телекоммуникационных спутников с напряжением сети 100 В. Применение GaN-транзисторов в двухтактной мостовой схеме со сдвигом фазы обеспечило КПД = 92,5% [4]. В 2025 г. несколько известных американских компаний заявили о начале производства серийных радиационно-стойких DC/DC-преобразователей, выполненных по гибридной технологии, в которых в качестве силовых ключей используются GaN-транзисторы. Например, максимальное значение КПД радиационно-стойкого 50-Вт преобразователя напряжения при 50-% нагрузке достигает 93%. Нитрид-галлиевая технология постепенно начинает доминировать благодаря преимуществам в производительности, плотности мощности, габаритах и термостабильности не только в гражданских применениях, но и в космическом и военном секторе.

Основные технические параметры разработанных предприятием модулей с повышенной мощностью (до 600 Вт макс.) приведены в табл. 1.

Представленные одноканальные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи напряжения преобразуют напряжение питания бортовых 28-, 42- и 100-В сетей к режимам необходимым для работы функциональной части аппаратуры, выполняя гальваническую развязку входа от выхода и корпуса прибора и обеспечивая повышение мощности до 600 Вт в сосредоточенной нагрузке.

Одним из достоинств предлагаемых изделий, выполненных по гибридно-пленочной технологии, является небольшой вес, что продиктовано высокой ценой вывода единицы массы полезной нагрузки на околоземную орбиту.

Из табл. 1 видно, что вес модулей находится в диапазоне 150–250 г.

К примеру, вес 500-Вт радиационно-стойкого преобразователя класса DC/DC, предназначенного для радиоэлектронной аппаратуры специального назначения, выполненного с использованием технологии

печатного монтажа и заливки герметизирующим и теплопроводящим компаундом, составляет 2,3 кг при габаритных размерах 290×144×40 мм. Гибридно-пленочный 600-Вт модуль HDCD/42-28-600/SP имеет вес 250 г, а размеры его корпуса составляют 104,9×55,2×14,50 мм. Удельная объемная мощность соответствует значению 7146 Вт/дм³, что является хорошим показателем для радиационно-стойких моделей и свидетельствует о высоком уровне миниатюризации.

Заметим, что высота корпуса этого гибридного модуля меньше в 2,75 раза высоты модуля, выполненного по технологии печатного монтажа. Снижение профиля преобразователя при увеличении энергетической плотности DC/DC-преобразователя необходимо во избежание увеличения концентрации тепловой энергии на основании преобразователя. Плоская конструкция модуля, созданного по гибридной технологии, обеспечивает достаточно большую поверхность охлаждения, а установка конструкций на металл является простым решением задачи по отводу тепла.

Для безопасной эксплуатации и расширения возможностей их практического использования модули оснащены набором сервисных и защитных функций. Интегрирована схема блокировки при пониженных напряжениях на входе, защита от короткого замыкания и перегрузки по току; при этом защиты являются самовосстанавливающимися. После устранения причины короткого замыкания модуль автоматически запускается в режиме плавного запуска.

Функция выключения внешним сигналом со стороны входа и выхода (выходы INH1 и INH2) повышает гибкость применения преобразователей в бортовой системе электропитания за счет реализации определенного алгоритма подачи напряжения к отдельным узлам функциональной части аппаратуры. Вопросы использования и организации интерфейса входов выключения

внешним сигналом в гибридно-пленочных модулях подробно рассмотрены в [5].

Функция регулировки выходного напряжения (HIX31S28, HCDC/42-5-150/SP, HDCD/100-5-150/SP, HDCD/42-12-200/SP, HDCD/100-12-200/SP) обеспечивает нестандартные значения напряжения подключением внешнего регулировочного резистора между выводом TRIM и общим проводом или выводом выходного напряжения в зависимости от требуемого направления регулировки. Общий диапазон регулирования напряжения не превышает $\pm 10\%$ от номинального значения. При параллельном соединении двух модулей (модели HDCD/42-28-350/SP, HDCD/42-24-350/SP, HDCD/100-28-350/SP, HDCD/100-24-350/SP, HDCD/28-28-350/SP) для работы на общую нагрузку функция выравнивания выходных токов осуществляет равномерное распределение тока между модулями. Выносная обратная связь обеспечивает стабилизацию напряжения непосредственно на выводах нагрузки. Некоторые модули, например HDCD/100-28R-350/SP, имеют вывод вспомогательного источника питания для служебных функций.

Модули испытывались на стойкость к воздействию ионизирующих излучений. Гарантируется стойкость к эффекту полной накопленной дозы не менее 100 крад (Si). Оценка дозовых эффектов проводилась воздействием низкоинтенсивного излучения с мощностью дозы 0,1 рад (Si)/с. Испытания проводились на гамма-установке. В качестве источника ионизирующего излучения использовалось гамма-излучение изотопа ⁶⁰Co.

Стойкость к одиночным эффектам гарантируется при воздействии заряженных частиц с пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) ≥ 75 МэВ·см²/мг. Критерием обратного отказа SET является переходная ионизационная реакция в виде изменения выходного напряжения $\geq \pm 10\%$ при минимальной длительности импульса ≥ 5 мс. Испытания

Таблица 1. Основные технические характеристики радиационно-стойких гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей с выходной мощностью 350–600 Вт для бортовых сетей КА с разными номинальными напряжениями

Модель	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Пульсация выходного напряжения, мВ	Габариты, мм	Вес, г
HDCD/28-28-350/SP	20~36	28	350	89	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-28R-350/SP	34~50	28	350	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-28-350/SP	30~50	28	350	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-24-350/SP	30~50	24	350	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HIX31S28	25~36	31	350	88	200	90,5×50,5×13,65	155
HDCD/42-28-430/SP	33~50	28	430	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-12-360/SP	33~50	12	360	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/100-28-400/SP	80~120	28	400	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-28-600/SP	33~50	28	600	90	150	104,9×55,2×14,50	250
HDCD/42-12-480/SP	33~50	12	480	90	150	104,9×55,2×14,50	250
HDCD/42-12R-480/SP	34~50	12	480	90	150	104,9×55,2×14,50	250

модулей на воздействие отдельных заряженных частиц проводились на базе циклотрона. Облучение осуществлялось ионами тантала ^{181}Ta с длиной свободного пробега в кремнии 116,6 мкм, полной энергией 2005,5 МэВ. Интегральный поток (флюенс) ионизирующих частиц составил 10^7 частиц/см². Предельный уровень радиационной стойкости позволяет применять модули в бортовой аппаратуре КА на разных орбитах в течение продолжительного времени.

Подробнее о методах испытаний преобразователей напряжения на стойкость к воздействию ионизирующих излучений по дозовым и одиночным эффектам см. [6].

На завершающем этапе производства каждое изделие проходит многоступенчатый выходной контроль, направленный на выявление потенциально ненадежных экземпляров.

Проверочные испытания выполняются по методикам национального стандарта GJB2438B-2017 «Общая спецификация производства гибридно-пленочных микросхем», который соответствует американскому стандарту MIL-PRF-38534F Hybrid Microcircuits, General Specification For. Комплекс проверок включает:

- визуальный внутренний контроль (выполняется перед герметизацией) (метод 2010);
- проверку на наличие малых и больших течей (герметичность, метод 1014);
- контроль содержания паров воды внутри корпуса (метод 1018);
- PIND-контроль (Particle Impact Noise Detection Test): контроль свободно перемещающихся частиц внутри корпуса гибридной схемы по уровню шума (метод 2020);
- испытания на постоянное ускорение (с использованием центрифуги) (метод 2001);
- термоциклирование (метод 1010);
- обработка в стабилизационной печи (метод 1008);
- электротермотренировка (метод 1015);
- проверку критических электрических параметров при крайних температурах;
- рентгеновский радиографический контроль.

Методы испытаний на долговечность и контроль качества изделий в процессе производства детально рассмотрены в [6].

Далее приведены эксплуатационные параметры наиболее востребованных 350-Вт

моделей HDCD/100-24-350/SP и HDCD/100-28-350/SP. Детальные электрические параметры модуля HDCD/100-28-350/SP приведены в табл. 2. Полнота приведенных данных позволяет потребителю осознанно выбрать устройство для применения в своей аппаратуре.

Абсолютные максимальные значения параметров модулей HDCD/100-24-350/SP и HDCD/100-28-350/SP:

- входное напряжение V_i : 0~130 В (HDCD/100-24-350/SP, HDCD/100-28-350/SP);
- выходная мощность P_o : 360 Вт;
- температура хранения T_{stg} : -65~150°C;
- температура пайки выводов T_h : 300°C (10 с).

Рекомендуемые условия эксплуатации:

- входное напряжение V_i : 70~120 В (HDCD/100-24-350/SP, HDCD/100-28-350/SP);
- выходной ток I_o : 1,46~14,58 А (HDCD/100-24-350/SP), 1,25~12,5 А (HDCD/100-28-350/SP);
- диапазон рабочих температур (на основании корпуса) T_c : -55~125°C.

Для снижения уровня кондуктивных электромагнитных помех на входных линиях преобразователя применяется двухзвенный LC-

Таблица 2. Электрические параметры DC/DC-преобразователя HDCD/100-28-350/SP

Параметр	Обозначение	Режим измерения (если не указано иное, $-55^\circ\text{C} \leq T_c \leq 125^\circ\text{C}$, входное напряжение $70\text{ В} \leq V_i \leq 120\text{ В}$, INH не используется, $C_L = 0$)	Минимальное значение	Максимальное значение	Единица измерения
Выходное напряжение	V_o	$V_i = 100\text{ В}$, $I_o = 12,5\text{ А}$	27,72	28,28	В
Выходной ток	I_o	$V_i = 70, 100, 120\text{ В}$	-	12,5	А
Пульсация выходного напряжения (от пика до пика)	V_g	$V_i = 100\text{ В}$, ширина полосы пропускания $BW = 20\text{ МГц}$, $I_o = 12,5\text{ А}$	-	280	мВ
Переходное отклонение при скачке входного напряжения	S_V	$V_i = 70 \rightarrow 120\text{ В}$, $I_o = 12,5\text{ А}$	-	200	мВ
Переходное отклонение при скачке тока нагрузки	S_I	$V_i = 100\text{ В}$, $I_o = 0\text{ А} \rightarrow 12,5\text{ А}$	-	420	мВ
Входной ток	I_{IN}	$V_i = 100\text{ В}$, $I_o = 12,5\text{ А}$	-	30	мА
Частота преобразования	f_s	$T_c = 25^\circ\text{C}$, $V_i = 100\text{ В}$, $I_o = 12,5\text{ А}$	300	500	кГц
КПД	η	$V_i = 100\text{ В}$, $I_o = 12,5\text{ А}$	-	89	%
Рассеиваемая мощность при коротком замыкании на выходе	P_D	$T_c = 25^\circ\text{C}$, $V_i = 100\text{ В}$, КЗ нагрузки	-	60	Вт
Емкостная нагрузка	C_L	$T_c = 25^\circ\text{C}$, $V_i = 100\text{ В}$, не оказывает влияние на параметры постоянного установившегося напряжения	-	5000	мкФ
Электрическое сопротивление изоляции	R_{ISO}	$T_c = 25^\circ\text{C}$, испытательное напряжение 500 В между входными и выходными клеммами, а также между любой входной клеммой и корпусом	100	-	МОм
Изменение выходного напряжения при скачкообразном изменении выходного тока	V_{ROR}	$T_c = 25^\circ\text{C}$, $V_i = 100\text{ В}$, 50%-нагрузка $\rightarrow$ полная нагрузка или полная нагрузка $\rightarrow$ 50%-нагрузка, 10%-нагрузка $\rightarrow$ 50%-нагрузка или 50%-нагрузка $\rightarrow$ 10%-нагрузка	-2800	2800	мВ
Время переходного процесса к установившемуся значению при скачке тока нагрузки	t_{ROR}	$T_c = 25^\circ\text{C}$, $V_i = 100\text{ В}$, 50%-нагрузка $\rightarrow$ полная нагрузка или полная нагрузка $\rightarrow$ 50%-нагрузка, 10%-нагрузка $\rightarrow$ 50%-нагрузка или полная нагрузка $\rightarrow$ 50%-нагрузка	-	2000	мкс
Переходное отклонение выходного напряжения (пик.) при изменении входного напряжения	V_{VOR}	$T_c = 25^\circ\text{C}$, входное напряжение $V_i = 70\text{ В} \rightarrow 120\text{ В}$, $I_o = 12,5\text{ А}$, входное напряжение $V_i = 120\text{ В} \rightarrow 70\text{ В}$, $I_o = 12,5\text{ А}$	-2800	2800	мВ
Время установления выходного напряжения при скачкообразном изменении входного напряжения	t_{VOR}	$T_c = 25^\circ\text{C}$, входное напряжение V_i : 70 В $\rightarrow$ 120 В, $I_o = 12,5\text{ А}$, входное напряжение V_i : 120 В $\rightarrow$ 70 В, $I_o = 12,5\text{ А}$	-	2000	мкс
Перерегулирование при запуске	V_{IO}	входное напряжение V_i : 0 $\rightarrow$ 100 В, $I_o = 12,5\text{ А}$	-	280	мВ
Задержка запуска	t_{TR}	входное напряжение V_i : 0 $\rightarrow$ 100 В, $I_o = 12,5\text{ А}$	-	50	мс
Время установления выходного напряжения после снятия КЗ	t_{LF}	$T_c = 25^\circ\text{C}$, $V_i = 100\text{ В}$, I_o : 0~12,5 А	-	50	мс

фильтр. Для соответствия более высоким требованиям к уровню радиопомех на подающих проводниках к 350-Вт модулям с входным напряжением 28 В рекомендуется применять внешний фильтр HFME/(20-50)-461-750 с коэффициентом ослабления помех 66,8 дБ на частоте 500 кГц.

В завершение раздела приведем технические параметры наиболее востребованного 350-Вт модуля NIX31S28 для бортовых сетей КА с номинальным напряжением 28 В. Подробные параметры (табл. 3) приводятся для демонстрации соответствия электрических характеристик модулей и вспомогательного функционала требованиям к устройствам данного класса, предназначенным для работы в БА КА.

Основные эксплуатационные параметры DC/DC-модуля электропитания NIX31S28

Абсолютные максимальные значения параметров модуля NIX31S28:

- входное напряжение V_i : 0–40 В;
- выходная мощность P_o : 385 Вт;
- температура хранения T_{stg} : –65~150°C;
- температура пайки выводов T_b : 300°C (10 с).
- Рекомендуемые условия эксплуатации:
- входное напряжение V_i : 25–36 В;
- выходной ток I_o : 1,25–12,5 А;

- диапазон рабочих температур (по основанию корпуса) T_c : –55~125°C.

Краткое представление 200-и 350-Вт DC/DC-модулей электропитания предприятия ХМТИ

Российским специалистам, занимающимся разработкой ракетно-космической и специальной техники, предприятие ХМТИ известно как крупный производитель полупроводниковой памяти космического и специального назначения. Предприятие серийно производит полупроводниковую память космического назначения 4-го поколения DDR4 и 5-го поколения DDR5. Производится многослойная высокоплотная 3D-память по технологии Package-on-Package.

Предприятие разрабатывает и производит радиационно-стойкие транзисторы, диоды, цифровые (ПЛИС, цифровые сигнальные процессоры, микропроцессоры и т.д.) и аналоговые микросхемы (операционные усилители, компараторы, источники опорного напряжения, ШИМ-контроллеры, линейные регуляторы с небольшим падением напряжения на регулирующем элементе и т.д.), а также широкую гамму гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей для авиакосмической электроники. Совмещение разработки кристаллов микросхем, транзисторов, диодов и гибридных микросхем на одном

предприятии гарантирует ускорение создания изделий и высокое качество готовой продукции.

Преобразователи напряжения изготавливаются по толстопленочной гибридной технологии. Применение технологии монтажа бескорпусных микросхем, полупроводниковых элементов и конструктивное оформление в цельнометаллическом герметизированном корпусе обеспечивают преимущества в небольших размерах и весе, высокой надежности и высокой радиационной стойкости. Охватываются уровни качества Н, УС и УВ.

Изделия предприятия применяются во многих космических программах, в которых используются спутники связи, спутники дистанционного зондирования Земли, навигационные спутники, космические станции и т.д. Долговременная орбитальная полетная практика подтверждает стабильность и надежность продукции предприятия.

Специалистам ХМТИ также удалось решить проблемы изготовления керамических подложек для гибридных изделий с выходными мощностями более 120 Вт, увеличить отвод тепла, обеспечить высокую механическую прочность и жесткость конструкции. В результате освоено производство высокоэффективных радиационно-стойких гибридно-пленочных DC/DC-модулей электропитания с выходными мощностями 200 и 350 Вт для работы в диапазонах напряжений 20–36 В,

Таблица 3. Электрические характеристики 350-Вт DC/DC-преобразователя NIX31S28

Параметр	Обозначение	Режим измерения (если не указано иное, –55°C ≤ T _c ≤ 125°C, входное напряжение: 31 ± 0,3 В, вход INH не используется, C _L = 0)	Минимальное значение	Максимальное значение	Единица измерения
Выходное напряжение	V _o	I _o = 12,5 А	27,72	28,28	В
Выходной ток	I _o	V _i = 25–36 В	–	12,5	А
Пульсация выходного напряжения (пик–пик)	V _R	ширина полосы пропускания BW = 10 кГц–20 МГц, I _o = 12,5 А	–	200	мВ
Переходное отклонение при скачкообразном изменении входного напряжения	S _V	V _i = 25 → 36 В, I _o = 12,5 А	–	280	мВ
Переходное отклонение при скачкообразном изменении выходного тока	S _I	I _o = 0 → 12,5 А	–	280	мВ
Входной ток	I _{IN}	полная нагрузка, вывод INH2 подключен к выходной земле	–	50	мА
Рабочая частота	f _s	I _o = 12,5 А	150	250	кГц
КПД	η	I _o = 12,5 А	88	–	%
Рассеиваемая мощность в режиме КЗ	P _o	КЗ нагрузки	–	50	Вт
Емкостная нагрузка	C _L	T = 25°C, не влияет на установившееся значение выходного напряжения	–	1000	мкФ
Электрическое сопротивление изоляции	R _{iso}	T = 25°C, напряжение 500 В между входным и выходным выводом и между каждым выводом и корпусом	100	–	МОм
Изменение выходного напряжения (пик.) при скачке тока нагрузки	V _{lor}	T = 25°C, 50-% нагрузка → полная нагрузка или полная нагрузка → 50-% нагрузка T = 25°C, 10-% нагрузка → 50-% нагрузка или 50-% нагрузка → 10-% нагрузка	–1680	1680	мВ
Время переходного процесса к установившемуся значению при скачке тока нагрузки	t _{lor}	T = 25°C, 50-% нагрузка → полная нагрузка или полная нагрузка → 50-% нагрузка T = 25°C, 10-% нагрузка → 50-% нагрузка или 50-% нагрузка → 10-% нагрузка	–	5000	мкс
Перерегулирование при запуске	V _{TO}	входное напряжение V _i : 0 → 31 В, I _o = 12,5 А	–	500	мВ
Время установления выходного напряжения	t _{TR}	входное напряжение V _i : 0 → 31 В, I _o = 12,5 А	10	30	мс
Время установления выходного напряжения после снятия КЗ	t _{LF}	T _A = 25°C, I _o : от КЗ до 12,5 А	–	30	мс
Порог срабатывания защиты от КЗ	I _L	T _A = 25°C, V _i = 31 В, защита от перегрузки по току	14,4	–	А
Пределы регулировки выходного напряжения	V _{trim}	снижение выходного напряжения до 90% относительно полного значения; повышение выходного напряжения до 110% относительно полного значения	25,2	30,8	В

Таблица 4. Состав и основные технические характеристики радиационно-стойких гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей с выходными мощностями до 350 Вт и рекомендуемые модули фильтрации помех для установки на входе преобразователей напряжения

Модель	Выходная мощность, Вт	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	КПД (тип.), %	Рекомендуемый фильтр ЭМП	Масса, г	Габариты, мм	Уровень качества
LDC/D28-5-200H/SP	200	20~36	5	40	87	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/28-12-350H/SP	350	20~36	12	29,2	89	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/28-28-350H/SP	350	20~36	28	12,5	91	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/42-5-200H/SP	200	34~50	5	40	88	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/42-12-350H/SP	350	34~50	12	29,2	90	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/42-28-350H/SP	350	34~50	28	12,5	91	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-5-200H/SP	200	70~120	5	40	89	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-12-350H/SP	350	70~120	12	29,2	91	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-20-350H/SP	350	70~120	20	17,5	92	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-28-350H/SP	350	70~120	28	12,5	92	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H

34~50 В, 70~120 В. Основные параметры модулей приведены в табл. 4, в которой также указаны модели помехоподавляющих фильтров для дальнейшего снижения уровня кондуктивных помех на входных подводящих проводниках.

Показатель удельной объемной мощности 350-Вт моделей соответствует значению 5579 Вт/дм³ при максимальном КПД = 92%. Модули выполнены в объеме, который полностью определяется необходимой поверхностью охлаждения. Плоская конструкция модулей обеспечивает достаточно большую поверхность охлаждения.

Внешний вид конструкции 350-Вт модуля LDCD/28-12-350H/SP показан на рис. 3.

Выходной контроль качества преобразователей осуществляется по методикам национального стандарта GJB2438B-2017 «Общая спецификация производства гибридно-пленочных микросхем».

Расчетное среднее время наработки до отказа модулей составляет 14000·10⁴ ч (при температуре корпуса 35°C, в условиях орбитального полета).

В процессе разработки модули испытываются на стойкость к воздействию ионизирующих излучений. Гарантируется стойкость к эффекту полной накопленной дозы не менее 100 крад (Si). Оценка дозовых эффектов проводится при небольших мощностях дозы 0,01 рад (Si)/с до накопленной дозы 30 крад (Si) и 0,1 рад (Si)/с до накопленной дозы 70 крад (Si). Испытания облучением низкой интенсивности обеспечивают

радиационный отклик полупроводниковых приборов максимально приближенным к радиационному отклику, возникающему при облучении на орбите.

Стойкость к одиночным эффектам гарантируется при воздействии заряженных частиц с пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) ≥ 75 МэВ·см²/мг: не проявляются обратимые и необратимые (катастрофические) одиночные эффекты. Испытания на стойкость к одиночным эффектам выполняются с использованием целого спектра воздействующих ионов – с набором характеристик ЛПЭ ионов эти испытания дают гарантию того, что прошедшие их устройства соответствуют своим спецификациям.

Таким образом, модули годятся для применения в бортовой аппаратуре спутников на разных орбитах.

В настоящее время 350-Вт модули предприятия поставляются исключительно на внутренний рынок для применения в аппаратуре тяжелых телекоммуникационных космических аппаратов и спутников специального назначения.

Выводы

К настоящему времени только две компании китайской авиакосмической отрасли производят радиационно-стойкие гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи с выходными мощностями 350–600 Вт, сочетая в себе высокую удельную объемную мощность, низкий профиль, небольшой вес с предельной повышенной рабочей температурой корпуса 125°C. Применение этих модулей позволяет уменьшить соотношение объема и веса источников вторичного электропитания к объему и весу всей электронной части бортовой аппаратуры. Применяемая совершенная элементная база и проверенная в многочисленных проектах структура обеспечивают надежное функционирование в условиях космического пространства. Осуществление состава и последовательно-сти испытаний оговоренными националь-

ными военными стандартами с целью выявления потенциально ненадежных изделий позволяет значительно повысить надежность продукции. Наличие комплекта защитных и вспомогательных функций обеспечивает соответствие требованиям к источникам вторичного электропитания, предназначенным для работы в составе систем энергоснабжения космических аппаратов и спутников.

Вероятно, новые изделия заинтересуют предприятия российского космического приборостроения, производящие ракетно-космическую технику, так как для обеспечения успешности проекта необходимо сотрудничать только с теми производителями компонентов, которые хорошо зарекомендовали себя за многие годы работы.

Литература

- Виноградов Б. А., Костюков Н. С., Харичева Д. Л. Герметичные металлокерамические соединения. М. Наука. 2004.
- Перссон М., Петерсен С., Содерберг Б. Эффективный DC/DC-преобразователь с низким выходным напряжением для бортовых резервированных систем обработки данных. Компоненты и технологии. №1. 2020.
- Попп Э., Содерберг Б. Простая модернизация DC/DC-преобразователя для применения в космической аппаратуре заменой радиационно-стойких MOSFET-транзисторов. Компоненты и технологии. №12. 2020.
- Жданкин В. Высокоэффективные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи повышенной мощности на основе нитрид-галлиевых транзисторов. Современная электроника. №9. 2025.
- Жданкин В. Дистанционное управление и внешняя синхронизация преобразователей напряжения. Компоненты и технологии. №5. 2017.
- Жданкин В. Гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи с предельным уровнем радиационной стойкости для космической отрасли. Часть 2. Электронные компоненты. №3. 2026.



Рис. 3. Внешний вид конструкции высокоэффективного радиационно-стойкого 350-Вт DC/DC-модуля электропитания LDCD/28-12-350H/SP